

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

MODELADO DEL DAÑO EN TÚNELES
DOVELADOS CON Y SIN
REVESTIMIENTO SECUNDARIO
MEDIANTE ARTICULACIONES
PLÁSTICAS

P R E S E N T A:

DANIEL ENRIQUE GONZÁLEZ RAMÍREZ

Asesor:

DR. GELACIO JUÁREZ LUNA

CDMX 2018

Índice

Índice	2
Resumen	5
PARTE I.....	6
1. Capítulo 1. Introducción	7
1.1 ANTECEDENTES.....	7
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO	7
2. Capítulo 2. Estado del arte	9
2.1 DOVELAS.....	9
2.1.1 <i>Comportamiento teórico de las dovelas</i>	10
2.1.1.1 Flexión	10
2.1.1.2 Axial.....	10
2.1.1.3 Cortante	10
2.2 JUNTAS LONGITUDINALES.....	11
2.2.1 <i>Comportamiento teórico de las juntas longitudinales</i>	12
2.2.1.1 Relación momento rotación propuesta por Janssen	12
2.2.1.2 Relación momento rotación propuesta por Gladwell.....	13
2.2.1.3 Relación momento rotación propuesta por Peña	14
2.3 JUNTAS CIRCUNFERENCIALES (ENTRE ANILLOS)	16
2.3.1 <i>Comportamiento teórico de las juntas circunferenciales</i>	17
2.3.1.1 Interacción por fricción	18
2.3.1.2 Interacción por acoplamiento mecánico	19
2.4 MODELOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA TÚNELES DOVELADOS	19
2.4.1 <i>Modelos simplificados</i>	19
2.4.2 <i>Modelos complejos</i>	20
2.5 FUERZAS QUE ACTÚAN EN UN TÚNEL DOVELADO.....	20
2.6 ESTADOS LÍMITE.....	21
2.6.1 <i>Mecanismos de colapso del revestimiento debido a las cargas de ovalización</i>	21
2.6.2 <i>Fenómeno “snap through” en juntas longitudinales</i>	22
2.6.3 <i>Análisis no lineal</i>	23
PARTE II.....	24
3. Capítulo 3. Descripción de los modelos experimentales.....	25
3.1 TÚNEL DE BLOM Y VAN OOSTERHOUT.....	25
3.1.1 <i>Geometría</i>	25
3.1.2 <i>Cargas</i>	26
3.1.2.1 Experimento C01.....	26
3.1.2.2 Experimento C02.....	27
3.2 TÚNEL DE ICA	27

3.2.1	Geometría.....	28
3.2.2	Cargas.....	28
4.	Capítulo 4. Mecanismos de colapso	31
4.1	VIGA.....	31
4.2	TÚNEL.....	33
PARTE III.....		34
5.	Capítulo 5. Modelado numérico	35
5.1	VIGA.....	35
5.2	TÚNEL BOTLEK RAILWAY	38
5.2.1	Modelado de anillos aislados	38
5.2.1.1	Discretización	38
5.2.1.2	Modelos constitutivos.....	39
5.2.1.3	Cargas.....	40
5.2.1.4	Resultados.....	41
5.2.2	Modelado del experimento C01.....	42
5.2.2.1	Discretización	42
5.2.2.2	Modelos constitutivos.....	43
5.2.2.3	Cargas.....	44
5.2.2.4	Resultados.....	44
5.2.3	Modelado del experimento C02.....	48
5.2.3.1	Discretización	48
5.2.3.2	Modelos constitutivos.....	48
5.2.3.3	Cargas.....	49
5.2.3.4	Resultados.....	50
5.3	TÚNEL CON DOBLE REVESTIMIENTO DE SECCIÓN VARIABLE	51
5.3.1	Modelo de anillo aislado.....	52
5.3.1.1	Discretización	52
5.3.1.2	Modelos constitutivos.....	52
5.3.1.3	Cargas.....	54
5.3.1.4	Resultados.....	54
5.3.2	Modelo de anillo aislado con revestimiento secundario.....	58
5.3.2.1	Discretización	58
5.3.2.2	Modelos constitutivos.....	59
5.3.2.3	Cargas.....	61
5.3.2.4	Resultados.....	61
5.3.3	Modelo de anillos sin revestimiento secundario.....	66
5.3.3.1	Discretización	66
5.3.3.2	Modelos constitutivos.....	66
5.3.3.3	Cargas.....	67
5.3.3.4	Resultados.....	67
5.3.4	Modelo de anillos con revestimiento secundario	72
5.3.4.1	Discretización	72
5.3.4.2	Modelos constitutivos.....	72
5.3.4.3	Cargas.....	74

5.3.4.4	Resultados.....	74
5.3.5	Comparación de la capacidad de los modelos.....	80
5.4	TÚNEL ICA	82
5.4.1	Modelado considerando anillos y revestimiento secundario.....	82
5.4.1.1	Discretización	82
5.4.1.2	Modelos constitutivos.....	83
5.4.1.3	Cargas.....	84
5.4.1.4	Resultados.....	85
5.5	TÚNEL CON DOBLE REVESTIMIENTO DE SECCIÓN CONTINUA.....	88
5.5.1	Anillo aislado sin revestimiento (posición débil) $K=0.93$	91
5.5.2	Anillo aislado sin revestimiento (posición fuerte) $K=0.93$	95
5.5.3	3 anillos sin revestimiento (posición débil) $K=0.93$	98
5.5.4	3 anillos sin revestimiento (posición fuerte) $K=0.93$	101
5.5.5	Anillo aislado continuo sin revestimiento $K=0.93$	105
5.5.6	Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.93$	108
5.5.7	Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.93$	109
5.5.8	Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.85$	109
5.5.9	Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.85$	114
5.5.10	Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.80$	119
5.5.11	Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.80$	124
5.5.12	Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.70$	129
5.5.13	Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.70$	134
5.5.14	Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.60$	139
5.5.15	Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.60$	144
6.	Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	154
	Referencias	157
	PARTE IV	159
A.	Cálculo de diagramas momento-curvatura	160
B.	Ejemplos numéricos	166
B.1.1	Momento incremental en el extremo	166
B.1.2	Momento incremental en el extremo y carga axial	167

Resumen

En este trabajo se estudian algunos modelos teóricos propuestos en la literatura sobre el comportamiento de las partes principales de un túnel, y posteriormente se proponen recomendaciones para modelar dichas partes, validando los resultados de algunos de estos modelos numéricos con pruebas experimentales con y sin revestimiento secundario reportados en la literatura.

En la primera parte se estudian algunas leyes constitutivas para representar el comportamiento de las dovelas, juntas longitudinales, juntas entre anillos y, además, se analiza el modelo propuesto en esta tesis para determinar el comportamiento del revestimiento secundario y su interacción con el anillo de dovelas (revestimiento primario).

En la segunda parte, se describen dos pruebas experimentales con los que se valida el modelado numérico. El primero es una prueba a escala 1:1 del túnel Botlek Railway en Holanda (BRT), el cual consta de 3 anillos de dovelas y cuyo objetivo principal fue analizar la influencia de las juntas longitudinales y la interacción entre anillos. La segunda prueba, también a escala 1:1, consta de dos medios anillos y un anillo de dovelas completo y, además, en una de las etapas de carga se coloca un revestimiento secundario. El objetivo de esta prueba experimental fue analizar el cambio de rigidez del conjunto de dovelas con revestimiento secundario y la interfaz que se genera entre los dos revestimientos.

En la tercera parte, se expone el modelado numérico propuesto y se analizan los resultados obtenidos, comparándolos con los reportados en las pruebas experimentales. Además, se realiza un modelo paramétrico en el que se estudia la influencia que tienen las juntas, la interacción entre anillos y el revestimiento secundario en la capacidad global de los túneles dovelados.

En la cuarta parte (apéndices), se desarrolla un procedimiento para calcular el diagrama momento – curvatura, el cual se valida con ejemplos que permiten entender el comportamiento a flexión de las estructuras primeramente a nivel sección. Posteriormente, se muestra el desarrollo de los mecanismos de colapso en un sistema dado, así como el cálculo de su capacidad estructural.

PARTE I

REVISIÓN DE LA
LITERATURA

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

El crecimiento de las grandes ciudades trae como consecuencia una demanda de servicios públicos. Sin embargo, las construcciones en la superficie han hecho de las obras subterráneas una necesidad para cubrir parte de estos servicios, principalmente el transporte y algunas obras hidrosanitarias.

Una de las estructuras con un gran potencial en este tipo de áreas son los túneles dovelados. Aunque se han desarrollado nuevos métodos constructivos como el de la TBM (acrónimo de Tunnel Boring Machine) los cuales facilitan la construcción de este tipo de obras. El estudio del comportamiento de los túneles dovelados en suelos blandos es relativamente nuevo.

En 1994, el Gobierno de Los Países Bajos fundó el Centro de Construcciones Subterráneas para explorar la posibilidad de construir bajo la superficie del suelo. Para obtener conocimiento y experiencia en el comportamiento de túneles dovelados, se financiaron algunos estudios experimentales en túneles que se estaban construyendo. El primero de ellos fue el SHT (acrónimo de Second Heinenoord Tunnel, en 1997, el cual fue ampliamente instrumentado, con lo que se obtuvo información abundante del comportamiento del túnel en suelo holandés. En el segundo, el BRT (acrónimo de Botlek Railway Tunnel) aparecieron zonas dañadas que en su momento no se les hallaba una explicación convincente. En vista de lo anterior, se realizaron una serie de experimentos a gran escala en la Universidad de Delft, mismos que se describen en el capítulo 3 de este trabajo.

De igual manera, la Ciudad de México se caracteriza por tener suelos blandos en los que se han construido obras subterráneas especialmente en los últimos años, tales como líneas del metro y redes de alcantarillado. En la construcción de túneles dovelados es una práctica común colocar un revestimiento secundario de concreto colado en sitio. Sin embargo, son pocos los estudios que se han hecho sobre la influencia que tiene este revestimiento en el comportamiento estructural del túnel. Es por esta razón que Aguilar *et al.* (2011) desarrolló un modelo experimental, como parte de un proyecto de ICA (Ingenieros Civiles Asociados), cuyo objetivo principal fue analizar el cambio de rigidez en el túnel debido a la colocación del revestimiento secundario.

1.2 Planteamiento del problema y objetivo

Un aspecto importante en el comportamiento estructural de los túneles dovelados es la interacción que existe entre los segmentos que forman el anillo, y a su vez, la de los anillos

entre sí. Si la interacción entre los anillos es débil y el suelo que los circunda no proporciona suficiente soporte, la capacidad estructural del túnel dependerá de la capacidad de las juntas longitudinales, extremos de dovelas. Por otro lado, si la interacción entre anillos es fuerte, la capacidad estructural del túnel dependerá de la capacidad de las dovelas. No obstante, en algunos casos se coloca además un revestimiento secundario formado por concreto colado en sitio, para lo cual surgen interrogantes como: ¿Qué efecto tiene este segundo revestimiento en el comportamiento estructural de los túneles dovelados?, ¿cuáles son los mecanismos de colapso y cuando ocurren?, ¿cómo pueden modelarse estos elementos (juntas, dovelas, revestimiento secundario) y sus interacciones utilizando un software comercial de análisis estructural?. Para contestar estas preguntas, en este trabajo se estudian algunos modelos teóricos propuestos en la literatura sobre el comportamiento de las partes principales del túnel, y posteriormente se proponen recomendaciones para modelar dichas partes, validando los resultados de algunos de estos modelos numéricos con pruebas experimentales reportadas en la literatura.

Capítulo 2. Antecedentes

En el presente capítulo se describen algunos trabajos de investigación reportados en la literatura, que estudian el comportamiento de las partes que forma un túnel de dovelas. De manera general, las principales partes de un túnel dovelado son: dovelas, anillos, juntas longitudinales y juntas circunferenciales, las cuales se muestran en la Figura 2.1 para su mejor comprensión.

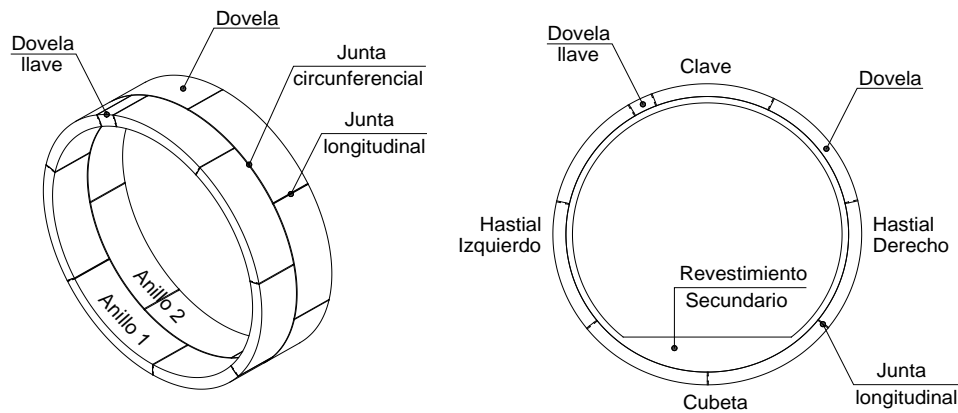


Figura 2.1. Principales partes del túnel dovelado

2.1 Dovelas

Las dovelas se fabrican con precisión milimétrica y tolerancias pequeñas. Su tamaño se elige tan grande como sea posible, resultando en un mínimo número de elementos por anillo, optimizando la velocidad de avance de la TBM. Además, otros factores que determinan el tamaño de las dovelas son el espacio disponible para transporte y almacenamiento, así como la máxima extensión disponible en los gatos de empuje de la tuneladora.

Los anillos de dovelas se colocan traslapados, de tal manera que las juntas de un anillo no coinciden con las del anillo contiguo. Si hay una interacción fuerte entre anillos, los momentos flexionantes en las juntas se transfieren a las dovelas del anillo contiguo, limitando las rotaciones de las juntas y aumentando la capacidad global del sistema.

En todos los anillos existe una dovela llave, más pequeña que el resto, con corte cónico que se coloca al final de la construcción del anillo. La cara frontal de un anillo terminado no es paralela a su cara trasera. Ésta última característica en los anillos permite describir trayectorias curvas en la longitud del túnel.

El refuerzo de las dovelas de concreto no solo se diseña para resistir los momentos y fuerzas que se presentarán en los estados límites, sino también se consideran las

solicitaciones que tendrán durante las etapas de erección, transporte y almacenamiento. Además, se coloca un refuerzo adicional en las partes de la dovela donde se apoyarán los gatos de empuje de la tuneladora durante la etapa constructiva.

Durante la etapa constructiva, en los anillos existe una carga axial producto del empuje de la maquina tuneladora que los mantiene unidos. No obstante, para colocar una nueva dovela algunos gatos se retraen, provocando que las conexiones entre algunos elementos se debiliten. Para asegurar la posición de las dovelas, las juntas se atornillan, asegurando también las bandas de estanqueidad. A medida que la maquina se aleja, los nuevos anillos colocados aseguran la posición de las dovelas en los anillos que se han colocado primero, con lo cual se pueden retirar los tornillos de las juntas para seguir utilizándolos en anillos posteriores.

2.1.1 Comportamiento teórico de las dovelas

El comportamiento de la dovelas puede asemejarse al comportamiento de una viga. Como se ha visto en secciones anteriores, las dovelas pueden trabajar a compresión axial, flexión o cortante, según la configuración de cargas que esté actuando en el anillo. Si la carga es uniforme, deformará al anillo concéntricamente, generando grandes fuerzas axiales en las dovelas. Si la configuración de las cargas es no uniforme (carga de ovalización), el comportamiento del anillo estará dominado por flexión, generando momentos flexionantes grandes en las dovelas. En el caso de existir revestimiento secundario, debido al aumento de rigidez en el anillo (sobre todo en el área de la cubeta donde los espesores son mayores), favorece el dominio de los esfuerzos por cortante en las dovelas.

2.1.1.1 Flexión

El comportamiento a flexión de las dovelas queda definido mediante una ley constitutiva momento – rotación, cuyo cálculo se analiza con detalle en el Anexo 1. La rigidez a flexión EI es la pendiente de la curva momento – curvatura.

2.1.1.2 Axial

La rigidez axial de las dovelas queda definida, al igual que un elemento viga, por $\frac{EA}{L}$. Los esfuerzos están dados por la relación $\sigma = \frac{P}{A}$ y la deformación unitaria como $\varepsilon = \frac{\delta}{L}$.

2.1.1.3 Cortante

Las deformaciones por cortante están definidas mediante la siguiente expresión (tomada de Tena 2007):

$$\Phi_y = \frac{12EI_x}{GA_{cy}L^2} = 24(1+\nu) \frac{A}{A_{cy}} \left(\frac{r_x}{L} \right)^2 \quad (2.1)$$

De la ecuación anterior, se aprecia que las deformaciones por cortante dependen de la relación entre el radio de giro de la sección transversal (r_x) con respecto a la longitud del elemento (L), que en el caso de vigas delgadas es un valor generalmente pequeño e inferior a la unidad. Por eso generalmente se desprecian las deformaciones por cortante en vigas, pero es claro que no debe hacerse en vigas cortas (Tena 2007).

En el caso de las dovelas, se revisa la relación h/L (altura/longitud). Si dicha relación es menor a 0.20, pueden despreciarse las deformaciones por cortante sin que los resultados del análisis se vean sensiblemente afectados. Si no es así, las deformaciones por cortante deben de tomarse en cuenta en el análisis.

2.2 Juntas longitudinales

Se denominan juntas longitudinales a las que existen entre dovelas en un anillo. El tipo de juntas más comunes entre dovelas son las planas, aunque también existen las convexas, de las cuales no se profundizará en este trabajo.

Cuando la junta rota (si es plana), un momento inducido por las fuerzas normales tratará de impedir que la junta se abra. Esto quiere decir que las juntas planas tienen la capacidad de transferir momentos flexionantes. La desventaja es que, cuando la junta sufra rotaciones considerables, las esquinas externas de las dovelas que forman la junta harán contacto, conduciendo a un daño local que puede provocar filtraciones de agua al interior del túnel, lo cual es indeseable. Por el contrario, las juntas convexas actúan más bien como una articulación, puesto que no tienen la capacidad de transmitir momentos flexionantes.

De acuerdo a la investigación realizada por Baumann (1992), el campo de aplicación de ambas juntas depende de las rotaciones que se presentarán en éstas, y las fuerzas normales presentes en el revestimiento (fuerzas normales a la junta y tangentes al anillo). Si ocurrieran rotaciones y fuerzas normales considerables, es preferible utilizar juntas convexas, ya que con éstas se reduce el riesgo de sufrir agrietamiento por aplastamiento debido al contacto entre las dovelas adyacentes a la junta. En caso contrario, debido a la gran zona de contacto en compresión cuando la junta es plana, es preferible usar éstas cuando las rotaciones y las fuerzas normales en la junta sean pequeñas.

El área de contacto entre dos dovelas en una junta longitudinal es libre, sin material de empaque, la superficie de contacto es concreto – concreto. Esta área de contacto está separada una altura j del cuerpo de la dovela y tiene un espesor menor que el espesor de la dovela, dejando una pequeña abertura en la junta (ver Figura 2.2). En esta abertura se colocan piezas de caucho (juntas de estanqueidad) que se estiran o se contraen dependiendo de si la junta se abre o se cierra, dando hermeticidad al interior del túnel. La hermeticidad en la junta es muy importante ya que si se pierde, el agua que fluya puede llevar consigo parte del suelo circundante, disminuyendo el soporte proporcionado por el suelo, acción que puede conducir a un mecanismo de colapso.

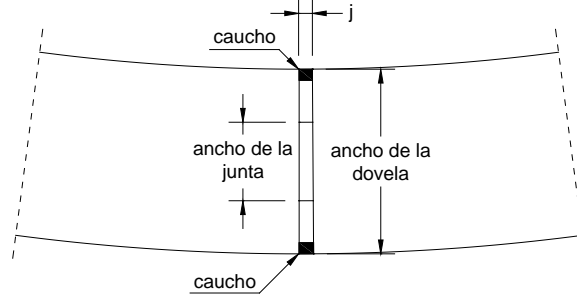


Figura 2.2. Junta longitudinal

2.2.1 Comportamiento teórico de las juntas longitudinales

Como se ha mencionado anteriormente, las juntas longitudinales tienen una gran influencia en la capacidad global de los túneles dovelados, por lo cual es de suma importancia entender su comportamiento para realizar un modelado que represente lo que se observa en el problema físico de los túneles.

En esta sección se abordarán algunas aproximaciones propuestas en la literatura para representar el comportamiento de las juntas longitudinales, donde las dos primeras (Janssen, 1983 y Gladwell 2007) se obtienen bajo la consideración de una carga axial constante y, la tercera (Peña 2012), se obtiene a partir de una carga axial variable.

2.2.1.1 Relación momento rotación propuesta por Janssen

Esta relación representa el comportamiento de una junta plana sin tornillos y considera un material elástico lineal de las dovelas. La primera rama es elástica lineal, y su rigidez es función del módulo de elasticidad y de las características geométricas de la junta. La segunda parte representa el comportamiento inelástico de la junta y está en función de la carga axial presente en la misma, el módulo de elasticidad y la geometría de la junta. Además, el momento máximo resistente de la junta se ubica en esta segunda rama.

$$\theta = \frac{12M}{Ebh^2} \text{ si } M < \frac{Nh}{6} \quad (2.2)$$

$$\theta = \frac{8N}{9Eb\left(\frac{2M}{Nh} - 1\right)^2} \text{ si } M \geq \frac{Nh}{6} \quad (2.3)$$

Las ecs. (2.2) y (2.3) (Galván, 2013) conforman la ley constitutiva de Janssen (1983), donde E es el módulo de elasticidad del concreto de la junta, M el momento flexionante, N la fuerza axial, h el largo de la junta, b el ancho y θ la rotación de la junta. Como una primera aproximación en el cálculo de la fuerza axial actuante en la junta (N), puede utilizarse la fórmula de “ketel” (B.4), la cual relaciona la presión radial uniforme (σ_0) con la

fuerza tangencial (N_0), como se muestra en la Figura 2.3. Dicha fuerza axial está dada en fuerza por unidad de longitud del anillo.

$$\sum N_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma_0 \cos(\varphi) r d\varphi \Rightarrow \sigma_0 r [\sin(\varphi)]_{-\pi/2}^{\pi/2} = \sigma_0 r [1 - (-1)] \Rightarrow N_0 = \sigma_0 r [N / m] \quad (B.4)$$

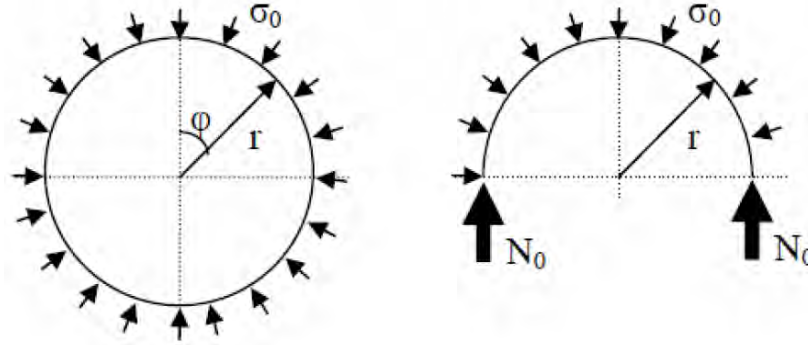


Figura 2.3. Relación entre la presión radial uniforme (σ_0) y la fuerza tangencial (N_0), tomada de T.G. van der Waart van Gulik 2010.

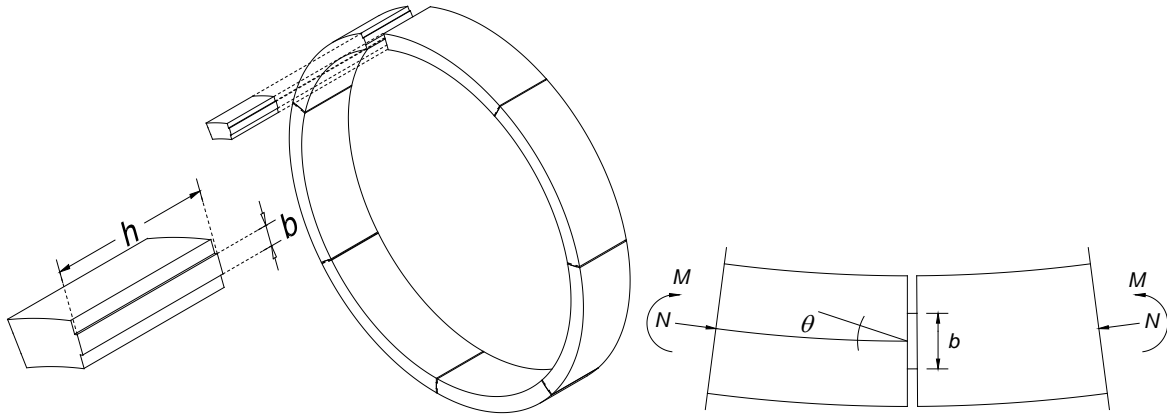


Figura 2.4. Variables involucradas en la relación momento-rotación propuesta por Janssen

2.2.1.2 Relación momento rotación propuesta por Gladwell

La relación momento-rotación de Gladwell es similar a la de Janssen (Figura 2.4), la cual es representativa de dos superficies planas sin tornillos, que consta de una parte elástica lineal y una parte inelástica. Las ecuaciones que reproduce el modelo de Gladwell (van der Vliet, 2006, citadas por Galván, 2013) son:

$$\mu = \frac{\pi \cdot \Phi}{16(1 - \nu^2)} \quad \text{si } \Phi \leq \frac{8(1 - \nu^2)}{\pi} \quad (2.5)$$

$$\mu = 1 - \frac{4(1 - \nu^2)}{\pi \cdot \Phi} \quad \text{si } \Phi > \frac{8(1 - \nu^2)}{\pi} \quad (2.6) \quad \text{donde:}$$

$\mu = \frac{M}{1/2Nh}$, $\Phi = \frac{\phi hbE}{N}$, E es el módulo de elasticidad, N carga axial, ν el coeficiente de Poisson, M el momento flexionante, h el largo de la junta y b el ancho.

En la Figura 2.5 se muestra la diferencia entre utilizar la relación propuesta por Jansen (1983) y Gladwell (2007).

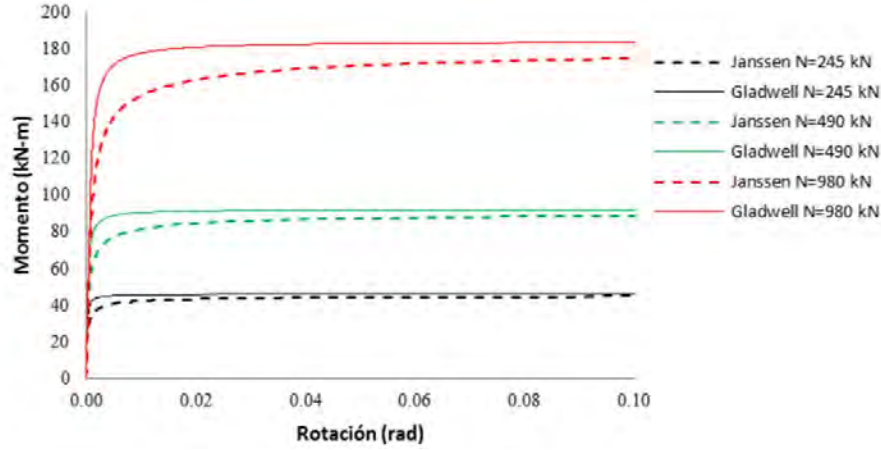


Figura 2.5. Comparación de las relaciones momento-rotación propuestas por Jansen y Gladwell para diferentes niveles de carga axial.

2.2.1.3 Relación momento rotación propuesta por Peña

La relación momento-rotación propuesta por Peña *et al.* (2012) se obtiene a partir de una carga axial variable, donde la excentricidad de la carga está dada por la relación entre la carga axial y el momento actuante interno de la doveta, los cuales dependen de las cargas que actúan en el anillo.

Esta relación momento-rotación se basa en el modelo de Gladwell (2007). Mientras que la relación de Gladwell (2007) está en función de una carga axial constante y requiere de una serie de iteraciones en los análisis, la relación de Peña *et al.* (2012) considera una carga axial variable y una excentricidad constante.

A continuación se presentan las ecuaciones que definen la ley momento-rotación propuesta por Peña *et al.* (2012), en las cuales el momento está en función de la rotación y de la excentricidad de la carga.

$$M = \frac{\pi h^2 b E \phi}{32(1-\nu^2)} \text{ si } e \leq \frac{h}{4} \quad (2.7)$$

$$M = \frac{\pi b E \left(\frac{h}{2} - e \right) \phi e}{2(1-\nu^2)} \text{ si } e > \frac{h}{4} \quad (2.8)$$

$$M_{\text{máx}} = P_{\text{máx}} e = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} f' c A_1 e \quad (2.9)$$

La ecuación (2.9) define el momento máximo resistente, $M_{\text{máx}}$, donde $P_{\text{máx}}$ es la carga de aplastamiento del concreto, calculada de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Concreto (NTCC-04) del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF-04). La rotación de fluencia está dada por:

$$\phi_y = \frac{32M_{\text{máx}}(1-\nu^2)}{\pi h^2 b E} \quad \text{si } e \leq \frac{h}{4} \quad (2.10)$$

$$\phi_y = \frac{2M_{\text{máx}}(1-\nu^2)}{\pi b E e \left(\frac{h}{2} - e\right)} \quad \text{si } e > \frac{h}{4} \quad (2.11)$$

En las ecs. (2.10) y (2.11), e es la excentricidad de la carga (la cual está dada por el momento y la carga axial), A_1 y A_2 es el área de contacto y el área de la figura de mayor tamaño, respectivamente, $f'c$ es la resistencia nominal del concreto a compresión, ν es el coeficiente de Poisson y E el módulo de elasticidad del concreto. Mientras que h y b son las propiedades geométricas de la junta (ver Figura 2.6).

La rigidez inicial y el momento máximo dependen de la excentricidad de la carga. Además, el momento máximo está asociado a una excentricidad límite. Después de dicha excentricidad, la rigidez inicial y el momento máximo decrecen.

La excentricidad límite corresponde al tercio medio de la junta ($h/3$). Por otro lado, cuando la excentricidad tiende a la mitad de la junta ($h/2$) la rigidez inicial tiende a cero. Para construir la relación momento-rotación basta con calcular el momento máximo y la rotación de fluencia. En la Figura 2.7 se muestran algunas relaciones momento-rotación para diferentes excentricidades de carga axial.

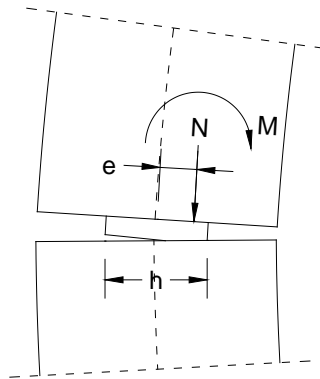


Figura 2.6. Excentricidad considerada en la relación propuesta por Peña (2009)

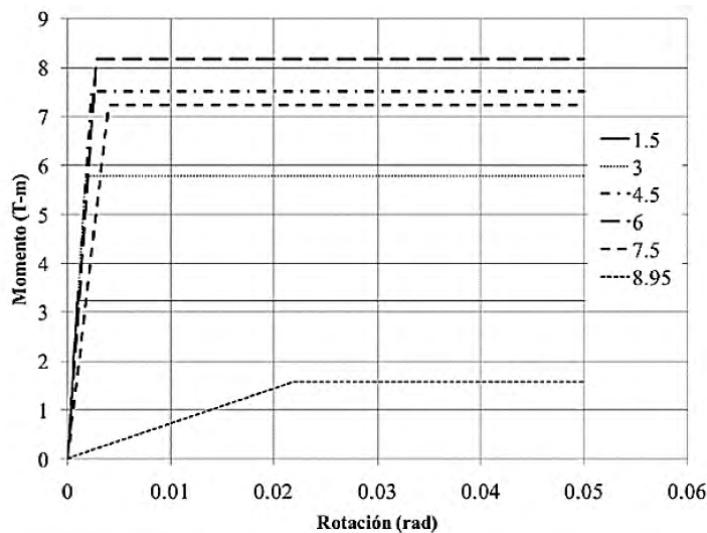


Figura 2.7. Relación momento-rotación bilineal para diferentes excentricidades (Peña et al., 2012)

2.3 Juntas circunferenciales (entre anillos)

Esta junta es la existente entre dos anillos adyacentes. El contacto entre dos anillos se da por medio de dos a cinco áreas de contacto por dovela, ya sea concreto-concreto o a través de un material de empaque. Además de estas áreas de contacto, las juntas entre anillos cuentan con un sistema de acoplamiento mecánico, llamado machihembrado (conocido en el idioma Inglés como “dowel and socket”), que asegura el acoplamiento entre anillos (ver Figura 2.8).

Según su función, existen dos principales tipos de machihembrado. El primero es no estructural, de dimensiones pequeñas, sin refuerzo, y su única función es la de hacer más fácil el acomodo entre anillos. Se coloca un material de empaque entre las superficies de contacto para disminuir el daño por aplastamiento en el concreto pero, sino hay suficiente carga axial, no habrá resistencia a las fuerzas cortantes, presentándose grandes deformaciones. El segundo es estructural, de dimensiones grandes y reforzadas para resistir fuerzas cortantes. Generalmente, se diseñan con un margen tangencial y radial entre la cara macho y hembra. El margen tangencial es relativamente grande, de tal manera que no existe interacción entre los anillos en este sentido. En el sentido radial, el margen es más pequeño, pero la interacción se dará cuando las deformaciones sean considerables y se haya vencido la fuerza de fricción generada por la carga axial en caso de existir esta última. De igual manera, se coloca un material de empaque para disminuir el daño en las zonas de contacto en el concreto. La madera contrachapada (triplay) es el material más comúnmente utilizado como empaque.

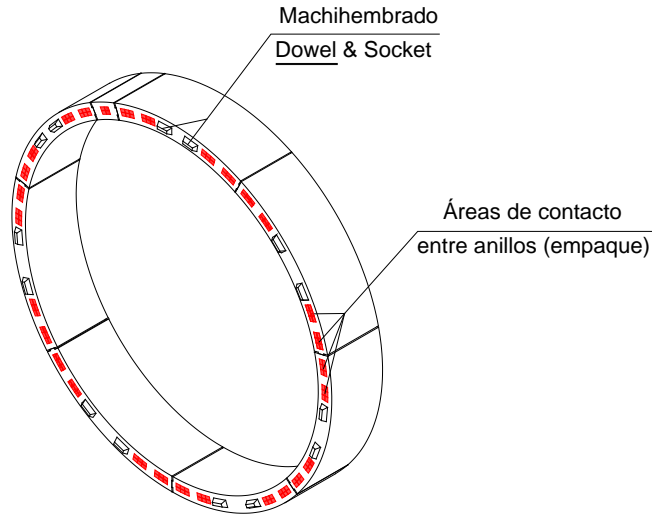


Figura 2.8. Áreas de contacto y machihembrado en juntas circunferenciales

Cuando ocurren deformaciones diferenciales entre dos anillos contiguos, se desarrolla una fuerza cortante en el material de empaque. La cooperación entre dos anillos se da vía fricción entre la superficie de concreto y el material de empaque. Esta fuerza de fricción depende de la carga axial aplicada al revestimiento, y del coeficiente de fricción concreto-material de empaque. Según lo observado experimentalmente por Robert y Hordijsk (1996), no hay deformación por cortante, sólo se presenta fricción por deslizamiento entre las dos superficies de contacto. Cuando se vence la fuerza de fricción, el sistema de acoplamiento mecánico entra en contacto, aportando la fuerza cortante que genera la interacción entre anillos.

2.3.1 Comportamiento teórico de las juntas circunferenciales

En los siguientes apartados se analizarán los dos principales tipos de interacción presentes en las juntas circunferenciales: por fricción y por acoplamiento mecánico.

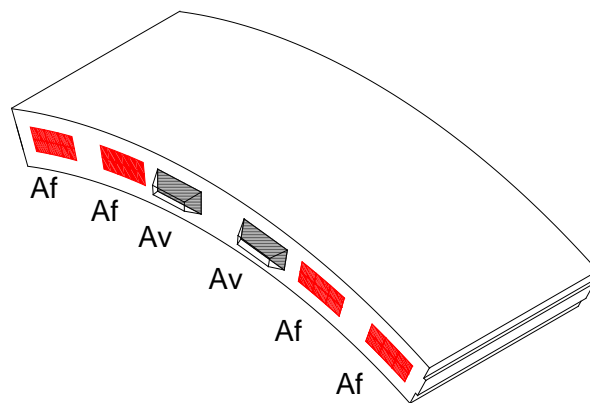


Figura 2.9. Áreas de fricción (Af) y de cortante (Av) en las juntas circunferenciales.

2.3.1.1 Interacción por fricción

Gijsbers y Hordijk (1997) estudian la rigidez a cortante entre anillos para dos materiales: plástico y madera contrachapada (triplay). Sólo investigaron el comportamiento a cortante de las áreas de contacto en el sentido radial, de la cual concluyeron lo siguiente:

- Para la prueba con material de empaque plástico se obtuvieron diferentes coeficientes de fricción para diferentes velocidades de deformación (para una velocidad baja un coeficiente de fricción bajo y para una velocidad muy baja un coeficiente de fricción despreciable). De la prueba se tiene que el plástico prácticamente no puede transmitir fuerzas cortantes. Además, debido a la disminución del plástico, las superficies de concreto entran en contacto, lo que significa que en una junta estas superficies ayudan en la transmisión de fuerzas cortantes. De esta manera, la transmisión de fuerzas dada por el contacto entre concreto y concreto, depende de cómo se establece dicho contacto, de que tan lisa es la superficie de concreto y de la fuerza normal aplicada. Para estas áreas (donde el concreto entra en contacto) se puede aplicar un coeficiente de fricción de 0.4 y 0.5, con cual se transmite una gran cantidad de fuerza cortante entre anillos.
- Por otro lado, para el caso de material de empaque de madera contrachapada se obtuvieron coeficientes de fricción, los cuales son dependientes de las fuerzas normales y de los desplazamientos aplicados. De esta etapa se obtuvieron resultados a corto plazo y no se obtuvo información del comportamiento del material de empaque a largo plazo. El espesor del material de empaque final fue de la mitad del espesor inicial, por lo que los bordes del concreto de las dovelas no entran en contacto. Debido a esto no ocurrieron grandes esfuerzos ni daños.

En el caso de los modelos numéricos que se desarrollaron en el presente trabajo, a la rigidez cortante para la interacción entre anillos, curva carga – desplazamiento, se le asignó un valor suficientemente grande ($K=100,000$ kN/m) para modelar que existe una “perfecta” transmisión de fuerzas cortantes entre un anillo y otro hasta que se alcance el cortante máximo que se puede transmitir, $V_{máx}$ (ver Figura 2.10), cuyo valor depende de la carga normal aplicada a las superficies (N) y el coeficiente de fricción (μ), que depende de las superficies de contacto, en este caso es concreto – triplay.

$$V_{máx} = \mu N \quad (2.12)$$

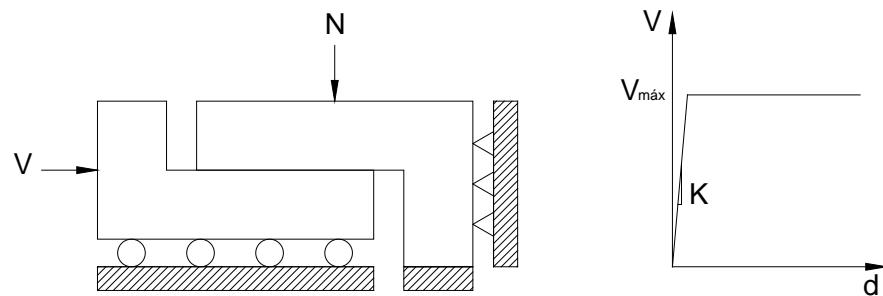


Figura 2.10. Constitutivo cortante – desplazamiento por fricción (adaptada de Tenorio, 2016)

2.3.1.2 Interacción por acoplamiento mecánico

A medida que la tuneladora se aleja de los anillos colocados, se pierde la fuerza axial que induce al túnel, provocando que la interacción entre anillos por fricción sea débil. Por esta razón, es de suma importancia que en las juntas circunferenciales exista el sistema de acoplamiento mecánico (machihembrado), pues sólo de esta manera se puede asegurar la interacción entre anillos, quedando definida entonces la capacidad del túnel por la capacidad de las dovelas, y no por la capacidad de las juntas, situación que es desfavorable.

El sistema de acoplamiento mecánico debe diseñarse de tal manera que las áreas A_v (Figura 2.9), sean capaces de transmitir las fuerzas cortantes sin desgarrarse.

2.4 Modelos para el análisis estructural de túneles dovelados

En el diseño de los túneles es importante tener un buen entendimiento de su comportamiento estructural, pues éste nos permitirá proponer adecuadas secciones, cuantías de acero, materiales, etc. que aseguren que el túnel desarrolle un buen desempeño durante su vida útil. Con este fin, se han desarrollado diversos modelos numéricos que, según su nivel de precisión, se dividen en simplificados y complejos.

2.4.1 Modelos numéricos simplificados

El túnel dovelado se puede analizar de manera simplificada mediante modelos numéricos. El modelado numérico ofrece una gran ventaja sobre métodos empíricos y soluciones analíticas. En general, los modelos simplificados consideran un comportamiento elástico-lineal de las dovelas, y consideran de manera simple la influencia de la menor rigidez de las juntas. Algunos modelos simplificados se describen a continuación:

1.- Anillo elástico continuo: Se considera un anillo continuo de propiedades elásticas, y no se considera la influencia de las juntas. Como podrá inferirse, éste modelo es el menos conservador, ya que sobre estima considerablemente la rigidez global del anillo.

2.- Anillo elástico con rigidez reducida: Al igual que el anterior, considera un anillo de propiedades elásticas, pero tomando en cuenta la influencia de las juntas al reducir la rigidez del anillo, como en el trabajo presentado por Peña y Basurto (2014).

3.- Anillo elástico con articulaciones en las juntas: Se considera un anillo elástico, pero considera la influencia de las juntas al modelarlas como articulaciones. Si se analiza un anillo aislado, éste modelo subestima la capacidad global del anillo puesto que se está modelando las juntas con rigidez rotacional cero.

4.- Anillo elástico considerando la rigidez de la junta: Al igual que el anterior, se considera un anillo elástico, pero en este caso se toma en cuenta la influencia de las juntas al modelarlas como resortes de rigidez rotacional.

5.- Anillo inelástico considerando la rigidez de la junta: Se considera un anillo de dovelas con propiedades inelásticas, y se toma la influencia de las juntas longitudinales al modelarlas como resortes de rigidez rotacional. El modelo 4 sería una mejor opción sobre el 5 si sólo se analiza un anillo aislado sin revestimiento secundario, puesto que las dovelas se mantendrían siempre en el rango elástico al fallar primero las juntas, si no se considera el soporte del suelo circundante. Sin embargo, si se analiza un modelo que tome en cuenta la interacción del anillo con los anillos contiguos, el revestimiento secundario, o ambos, el modelo 5 será una mejor representación del fenómeno ya que bajo estas condiciones se forzará a las dovelas a alcanzar su resistencia máxima, y el modelo 4 sobre estimaría la capacidad global del anillo. En el presente trabajo, se realizarán los análisis con este tipo de modelos.

2.4.2 Modelos numéricos complejos

De acuerdo con Galván (2013), en el caso de los modelos complejos, las dovelas son modeladas mediante elementos sólidos 2D o 3D mientras que las juntas se consideran mediante elementos de contacto o de interfaz. También se puede considerar la no-linealidad del material y el acero de refuerzo. Además si se toma en cuenta el efecto del acoplamiento entre anillos, se tiene una mayor precisión al reproducir su comportamiento comparado con un modelo simplificado. Por otro lado, el tiempo computacional que requiere en su solución es muy grande, lo cual se vuelve en una desventaja si se compara con el tiempo que requiere un modelo numérico simplificado.

2.5 Fuerzas que actúan en un túnel dovelado

Las fuerzas en un túnel son causadas por cargas presentes durante la etapa de construcción y durante su uso. La TBM modifica las presiones naturales del suelo y el agua e impone una gran carga axial en el revestimiento del túnel. Al colocarse el anillo de dovelas, se inyecta lechada para rellenar el espacio que queda entre la parte exterior del revestimiento y el suelo que lo rodea, de tal manera que el túnel flota cuando éste permanece líquido, pero cuando alcance su resistencia servirá de soporte directo al túnel. Todos estos factores determinan la fuerza resultante en el revestimiento en la etapa de construcción, y también tendrán cierta influencia durante la etapa de servicio.

Las fuerzas que actúan en el revestimiento del túnel pueden dividirse en axiales, radiales y tangenciales. Las axiales son provocadas por el empuje de la tuneladora durante la etapa constructiva. Estas fuerzas se aplican directamente al último anillo colocado, y a través de las juntas circunferenciales se transmiten a los anillos adyacentes. A medida que la tuneladora avanza, solo una parte de la carga axial original permanece en el revestimiento. Se estima que el remanente de carga axial es de aproximadamente el 20 por ciento de la inicial.

Según sus características propias, el suelo puede cargar o relajar el revestimiento. Dependiendo de las deformaciones del revestimiento, fuerzas activas o pasivas actúan en él. Diferencias entre las presiones verticales y horizontales resultan en una carga no uniforme, denominada “carga de ovalización”.

Al momento de ensamblar los anillos de dovelas, éstos se encuentran protegidos por el escudo de la TBM. A medida que ésta se aleja, se retira el escudo que protege a los anillos, dejándolos gradualmente expuestos a las acciones del suelo circundante. Debido a que el diámetro final del revestimiento es menor al diámetro de la TBM, queda un espacio libre de entre 10 y 15 centímetros entre ambos. Para prevenir asentamientos bruscos del suelo que rodea el revestimiento, se inyecta lechada a esta abertura.

2.6 Estados límite

Se han realizado numerosos análisis y experimentos enfocados en el estado límite de servicio. No obstante, algunos investigadores han estudiado también el comportamiento y los mecanismos de falla del revestimiento primario de los túneles en el estado límite último. En este trabajo se presentará además el estudio de estos mecanismos de colapso cuando existe también un revestimiento secundario.

Un túnel puede fallar a causa de varios mecanismos. El suelo que circunda el revestimiento, o el revestimiento mismo pueden fallar. Bakker (2000) describe el colapso en el túnel debido a la falla del suelo que circunda el revestimiento, y Blom (2000) presenta un estudio donde discute los mecanismos de colapso del túnel, pero enfocándose en la falla del revestimiento mismo.

2.6.1 Mecanismos de colapso del revestimiento debido a las cargas de ovalización

Cuando ocurre una ovalización horizontal en los túneles, el suelo que hace contacto con los hastiales del túnel se comprime, disminuyendo la diferencia entre los esfuerzos verticales y horizontales presentes en el revestimiento, produciéndose un revestimiento flexible en un medio rígido en el que los esfuerzos en el revestimiento serán principalmente por compresión. Los momentos flexionantes en el anillo disminuirán y el mecanismo de colapso será por una falla por compresión en el revestimiento (Bakker 2000). Bakker investigó también los momentos de segundo orden (generados por efectos geométricos) y concluyó que para pequeñas deformaciones del revestimiento los momentos serán menores,

y para grandes deformaciones los momentos serán mayores. En caso de ovalización horizontal, el suelo tiene una influencia positiva en la capacidad última de carga del revestimiento.

Blom (2002) también estudio el comportamiento del revestimiento sujeto a cargas de ovalización. Al incrementar la carga, los momentos flexionantes en el revestimiento también se incrementan hasta que en algún punto del revestimiento se alcanza su capacidad máxima a flexión. Al igual que Bakker (2000), Blom (2002) concluyó que el incremento de las cargas fue compensado por el soporte lateral del suelo, permitiendo al anillo continuar estable. Bajo estas condiciones, el estado límite último queda determinado por la capacidad a compresión de las dovelas.

2.6.2 Fenómeno “snap through” en juntas longitudinales

El revestimiento está sujeto a fuerzas normales y momentos flexionantes, que pueden provocar inestabilidad local, como el pandeo. Cuando las deformaciones en el anillo son tan grandes que éste no puede seguir transmitiendo las fuerzas normales, las dovelas pueden “despegarse”, lo que significaría el colapso del revestimiento. Este comportamiento fue estudiado por Blom (2002) en un anillo aislado, soportado parcialmente por suelo. Cargó este anillo con una carga radial uniforme y una carga de ovalización incremental. A medida que incrementa la carga de ovalización, los momentos flexionantes en el anillo crecen, hasta que se forma una articulación plástica en la parte inferior del revestimiento. El anillo permanece estable al incrementarse la carga hasta que se desarrollan dos articulaciones plásticas simultáneamente en la parte superior del anillo. Entre estas dos articulaciones hay una junta longitudinal que se “despegará”, provocando el colapso del sistema. Blom (2002) calculó que la carga que provoca que la junta se despegue es tres veces mayor a la que provoca la primera articulación plástica. Este mecanismo de colapso puede darse en un anillo aislado si se incluye el soporte lateral que brinda el suelo. No obstante, en el modelo experimental no hay suelo que circunde el revestimiento y brinde este soporte, por lo que las articulaciones no se forman en las dovelas, sino en las juntas longitudinales (puntos débiles en el anillo).

Cuando se alcanza la capacidad a momento en una dovela o una junta longitudinal, las deformaciones aumentan considerablemente si el anillo está aislado. Pero en campo, tal como en las pruebas experimentales, las deformaciones radiales de un anillo en particular están limitadas por la transmisión de fuerzas a los anillos contiguos, dando al sistema una mayor capacidad.

En la práctica, y en un análisis lineal, la aparición de la primera articulación corresponde a la máxima capacidad del revestimiento del túnel. Sin embargo, al hacer los análisis no lineales, la carga puede seguirse incrementado antes de llegar al colapso. De acuerdo a lo reportado por Blom (2002), y los resultados presentados en este trabajo de investigación

pueden formarse múltiples articulaciones en las dovelas y/o en las juntas del túnel antes de llegar al colapso.

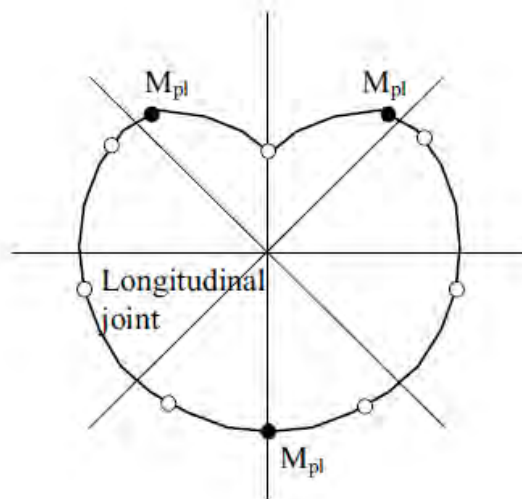


Figura 2.11. Fenómeno “snap through”, tomada de Blom (2002)

2.6.3 Análisis no lineal

En el estado límite último, el colapso está definido como la situación en la que las deformaciones crecen infinitamente con un incremento de carga prácticamente nulo, la rigidez ha llegado a cero. El suelo que circunda el revestimiento impide que éste se deforme libremente, teniendo una influencia positiva en dichas deformaciones. No obstante, en el experimento a gran escala del BRT y el túnel de ICA, no se incluye la presencia del suelo.

PARTE II

PRUEBAS

EXPERIMENTALES

DISPONIBLES EN LA

LITERATURA

Capítulo 3. Descripción de las pruebas experimentales

En el presente capítulo se describen las características principales de algunas pruebas experimentales disponibles en la literatura, las cuales servirán de apoyo para validar los modelos numéricos presentados en esta tesis, particularmente para predecir los mecanismos de colapso en túneles dovelados con y sin revestimiento secundario.

3.1 Túnel de Blom y Van Oosterhout

En la Universidad de DELFT se ensayó un espécimen a gran escala de un túnel construido con dovelas prefabricadas de concreto. Las características geométricas y propiedades de los materiales de la prueba experimental corresponden con el Túnel Botlek Railway (BRT), construido en Rotterdam, Holanda; estos ensayos fueron realizados en el laboratorio Stevin II de la Universidad de DELFT (Luttikholt, 2007).

La prueba consistió en tres anillos formados por dovelas. Las cargas consideradas fueron: una carga radial uniforme, la cual simula las presiones en el túnel debido a la profundidad a la que éste se encuentra; una carga de ovalamiento radial que representa la diferencia entre cargas horizontales y verticales debida al tipo de suelo en el que éste está situado; y una carga aplicada axialmente (en dirección al eje longitudinal del túnel), la cual simula la fuerza que ejercen los gatos de la tuneladora sobre el anillo para impulsarse.

El experimento consistió en dos tipos de prueba, las cuales fueron etiquetadas como C01 y C02. La diferencia entre ellas es que en la C01 se consideró una fuerte interacción entre anillos debido al efecto de la fuerza axial (en dirección hacia el eje longitudinal del túnel) que inducen los gatos de la tuneladora a los anillos, mientras que en la C02 la fuerza en dirección al eje de túnel es pequeña (0.125 veces la fuerza de C01), dando lugar a una baja interacción entre anillos.

3.1.1 Geometría

El modelo consistió en tres anillos de 9.05 m de diámetro central, como el mostrado en la Figura 3.1, los cuales están formados por la unión de 7 dovelas y 1 dovela llave. Las dovelas y la dovela llave tienen respectivamente una longitud radial de 3.68 m y 0.76 m, ambas tienen una sección transversal de 1.50 m x 0.40 m. La sección transversal de las dovelas tiene 9.72 cm² de acero en el lecho superior e inferior (0.18% de cuantía según Van de Waart Van Gulik, 2010).

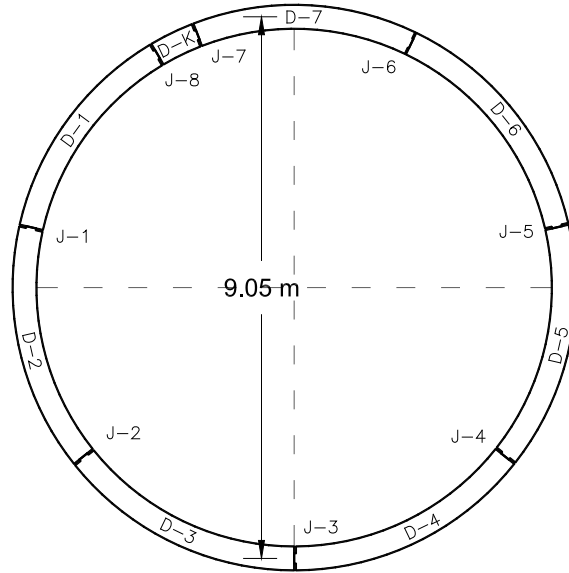


Figura 3.1. Geometría de un anillo del BRT.

3.1.2 Cargas

3.1.2.1 Experimento C01

Carga radial uniforme: Se aplicó con 28 gatos hidráulicos (cada uno con 850 kN de capacidad), cada uno de los cuales ejerció una carga de 660 kN en dirección radial.

Carga axial: Simultáneamente a la carga radial uniforme, se ejerció una carga axial (en la dirección longitudinal del túnel) con 14 gatos hidráulicos (cada uno con 1200 kN de capacidad), cada uno de los cuales ejerció una carga de 800 kN en dirección axial, haciendo un total de 11,200 kN.

Carga de ovalización: Después de aplicar los dos pasos de carga anteriores, se introdujo una carga cosenoidal (B.13) a lo largo de la circunferencia del revestimiento (Figura 3.2), mediante incrementos y decrementos en los gatos de la carga radial uniforme, hasta tener el estado de cargas de ovalización, que en este caso se alcanzaron cargas de +37 kN (+ Δ_q) en la clave y la cubeta, y -37 kN (- Δ_q) en los hastiales del túnel (puntos críticos de carga).

$$p = q - \Delta_q \cdot \cos(2\theta) \quad (\text{B.13})$$

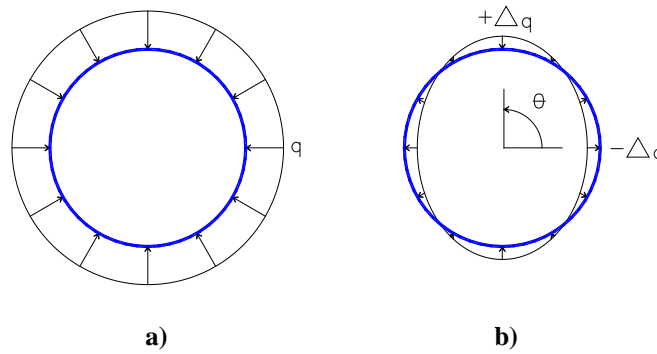


Figura 3.2. a) diagrama de carga radial uniforme y b) diagrama de carga cosenoidal, adaptada de Uijl (2003)

3.1.2.2 Experimento C02

Carga radial uniforme: Se aplicó con 28 gatos hidráulicos (cada uno con 850 kN de capacidad), cada uno de los cuales ejerció una carga de 660 kN en dirección radial.

Carga axial: Simultáneamente a la carga radial uniforme, se ejerció una carga axial (en la dirección longitudinal del túnel) con 14 gatos hidráulicos (cada uno con 1200 kN de capacidad), cada uno de los cuales ejerció una carga de 100 kN en dirección axial, haciendo un total de 1400 kN.

Carga de ovalización: Después de aplicar los dos pasos de carga anteriores, se introdujo una carga cosenoidal (B.13) a lo largo de la circunferencia del revestimiento (Figura 3.2), mediante incrementos y decrementos en los gatos de la carga radial uniforme, hasta tener el estado de cargas de ovalización, que en este caso se alcanzaron cargas de +24 kN ($+\Delta q$) en la clave y la cubeta, y -24 kN ($-\Delta q$) en los hastiales del túnel (puntos críticos de carga).

3.2 Túnel de ICA

Para conocer el comportamiento geotécnico y estructural de un túnel de dovelas con revestimiento secundario, ICA (Ingenieros Civiles Asociados) realizó un modelo a escala real (reportado por Aguilar *et al.* 2011) que permitiera observar el cambio de rigidez del conjunto de dovelas con revestimiento secundario y la interfaz que se genera entre los dos revestimientos.

El espécimen consta de dos medios anillos y un anillo de dovelas completo para simular la participación de los anillos adyacentes. Se instrumentaron los anillos de dovelas, la interfaz y el revestimiento secundario, así como el perímetro exterior, para medir las deformaciones y obtener esfuerzos. Se varió la relación de cargas horizontales y verticales, para simular diferentes condiciones de suelo. Además, se aplicó una carga axial para simular la fuerza que ejercen los gatos de la tuneladora sobre los anillos para impulsarse, generando una interacción importante entre los anillos de dovelas (Aguilar *et al.* 2011).

El experimento consistió en dos etapas principales. En una primera etapa, el conjunto de anillos fue sometido a una serie de cargas de ovalización con relación Ph/Pv (Presión horizontal/Presión vertical) de 0.83. Posteriormente, con el sistema cargado, se colocó un revestimiento secundario y se incrementaron las cargas de ovalización, pero ésta vez con diferentes relaciones Ph/Pv de 0.83, 0.61, 0.50 y 0.40.

3.2.1 Geometría

Cada anillo está formado por siete dovelas de longitud de arco de 4.0 m, más una dovela llave de 1.86 m, de sección transversal con ancho $L=1.50$ m, altura $h=0.40$ m y, posteriormente, se le incorpora un revestimiento secundario; la dovela se reforzó simétricamente con acero longitudinal $A_l=12.5$ cm² en la parte superior e inferior y transversal $A_t=2.85$ cm². La junta longitudinal tiene un ancho $b=1.39$ m y una altura $a=0.17$ m. El diámetro interno del anillo dovelado es de $d=9.11$ m, como se muestra en la Figura 3.3. Las propiedades mecánicas del concreto son: el módulo de elasticidad $E_c=21$ GPa y el esfuerzo último a compresión $f'_c=23.5$ MPa. Las propiedades del acero de refuerzo son: el módulo de elasticidad $E_s= 200$ GPa y el esfuerzo de fluencia $f_y=412$ MPa.

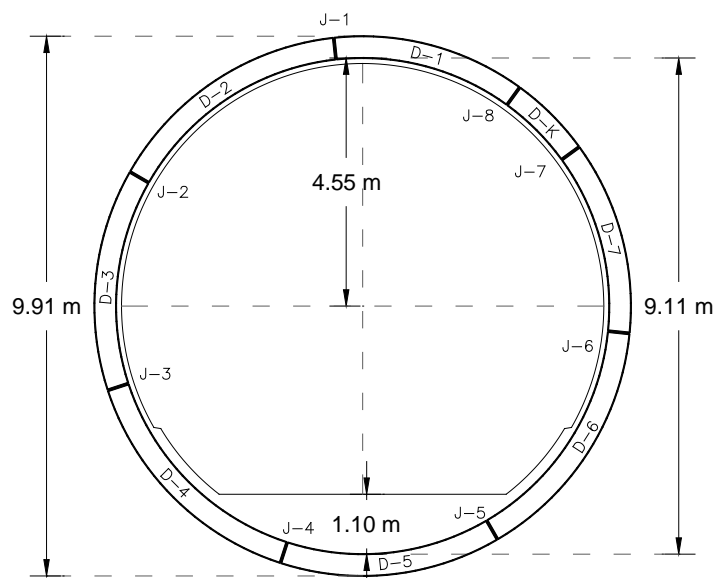


Figura 3.3. Geometría del anillo central del túnel de ICA.

3.2.2 Cargas

Para analizar el comportamiento del modelo experimental, se aplicaron las cargas de servicio y las cargas de diseño, a corto (CP) y a largo plazo (LP). Dichas cargas se resumen en la Tabla 1.

Cargas de servicio (t)		Cargas de diseño (t)	
CP	LP	CP	LP
59.04	68.34	88.80	102.00

Tabla 1. Cargas aplicadas al modelo experimental de ICA

Las cargas mostradas en la tabla se aplicaron por etapas como se describe a continuación:

Etapas 1 y 2: En estas etapas de carga se aplicó el 20% de la carga de servicio a corto plazo. La aplicación de la carga se realizó de manera uniforme, es decir, la relación Ph/P_v es 1.00. El propósito de esta carga fue hacer un reacomodo de las dovelas para asegurar que estas estuvieran en la posición correcta al momento de aplicar las cargas de servicio y de diseño.

Etapas 3: Se aplica la carga de servicio a corto plazo (S-CP), manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.83. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a cero.

Etapas 4: Se aplica el 85% de la carga de diseño a corto plazo (D-CP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.83. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a la carga de servicio a corto plazo (S-CP).

Al terminar la etapa 4, se coló el revestimiento secundario, y a los 28 días se continuaron las siguientes etapas de cargas.

Etapas 5: Se aplica el 85% de la carga de diseño a corto plazo (D-CP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.83. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a la carga de servicio a corto plazo (S-CP). El propósito de esta etapa de cargas (idéntica a la etapa 4) fue estimar la contribución del revestimiento secundario a la rigidez global del sistema.

Etapas 6: Se aplica la carga de servicio a largo plazo (S-LP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.61.

Etapas 7: Se aplica la carga de diseño a largo plazo (D-LP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.61. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a la carga de servicio a corto plazo (S-CP).

Etapas 8: Se aplica la carga de diseño a largo plazo (D-LP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.50. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a la carga de servicio a corto plazo (S-CP).

Etapas 9: Se aplica la carga de diseño a largo plazo (D-LP) manteniendo una relación constante y no uniforme Ph/P_v de 0.40. Posteriormente, se retira la carga manteniendo la misma relación hasta llegar a la carga de servicio a corto plazo (S-CP).

Las etapas descritas anteriormente se muestran para mayor claridad en la Figura 3.4.

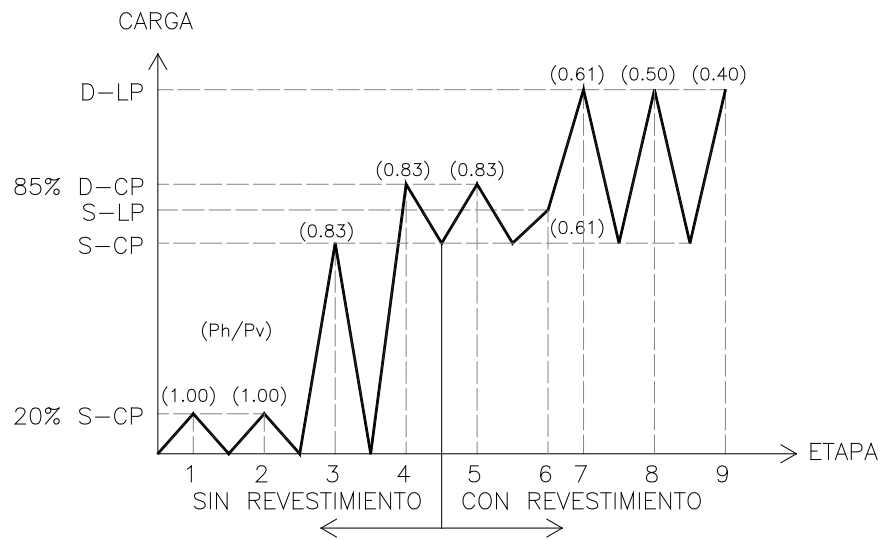


Figura 3.4. Etapas de carga en el modelo experimental de ICA

Capítulo 4. Mecanismos de colapso

Antes de entrar en detalle con el modelo numérico del túnel, se analizará un ejemplo sencillo de una viga simplemente apoyada en los extremos para entender las bases que soportan dicha modelación, así como un mejor entendimiento de los resultados que éste nos arroja. Posteriormente se extrapolará este ejemplo al caso que nos interesa, que es el de un túnel dovelado, aunque de hecho, es aplicable a cualquier tipo de estructura.

4.1 Viga

Se realizó un ejemplo sencillo donde se explica el mecanismo de colapso de un sistema. Se trata de una viga simplemente apoyada con una carga incremental P al centro (Figura 4.1), que genera un diagrama de momentos como el mostrado en la Figura 4.2, cuyo momento máximo se da al centro y es $M=PL/4$.

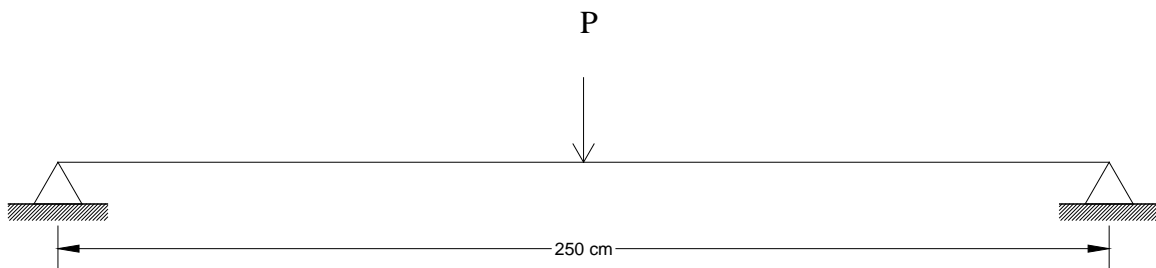


Figura 4.1. Viga ejemplo.

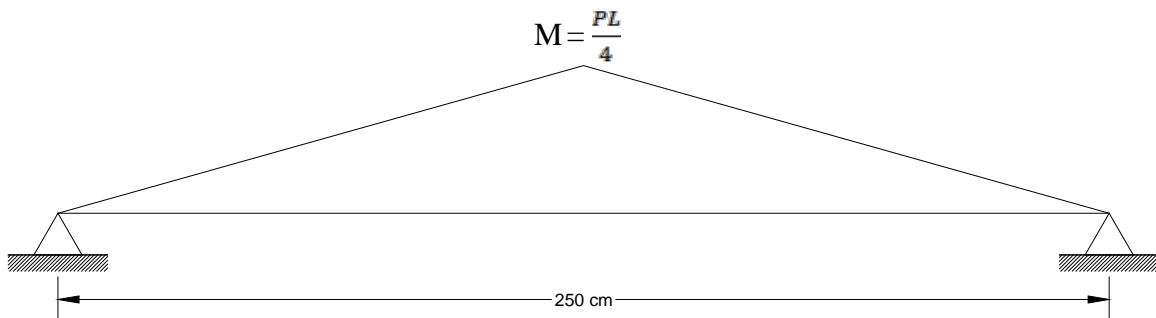


Figura 4.2. Diagrama de momentos de la viga ejemplo.

Conforme se incremente la carga P , la viga se deformará como se muestra en la Figura 4.3, hasta que se formen las articulaciones plásticas necesarias para volver inestable al sistema, que en este caso es solo una y se forma al centro del claro. Esta articulación se formará cuando el momento en el centro sea igual al momento plástico (M_y), el cual depende de las

características de la sección transversal del elemento, que para este caso se utilizaron las del ejemplo mostrado en el anexo (ver Figura 4.4)

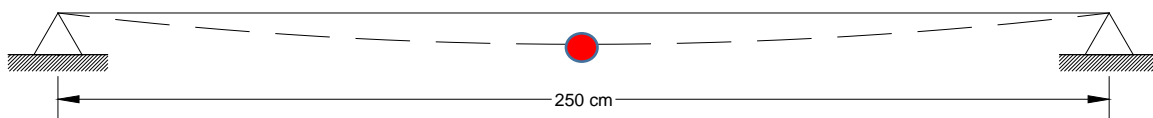


Figura 4.3. Deformada de la viga ejemplo y formación de la articulación.

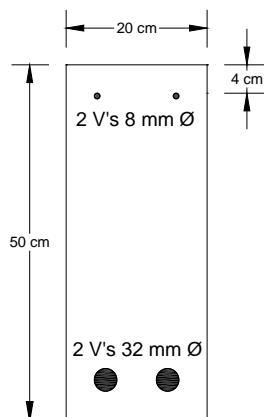


Figura 4.4. Sección transversal de la viga ejemplo.

Dadas ciertas características de la sección, puede calcularse un diagrama Momento – curvatura, que describe el comportamiento a flexión del sistema a nivel sección. De dicho diagrama, puede generarse una curva Momento – Rotación (Figura 4.5), la cual describe el comportamiento del sistema a flexión a nivel elemento y, en este caso, a nivel global puesto que el sistema está formado por solo un elemento.

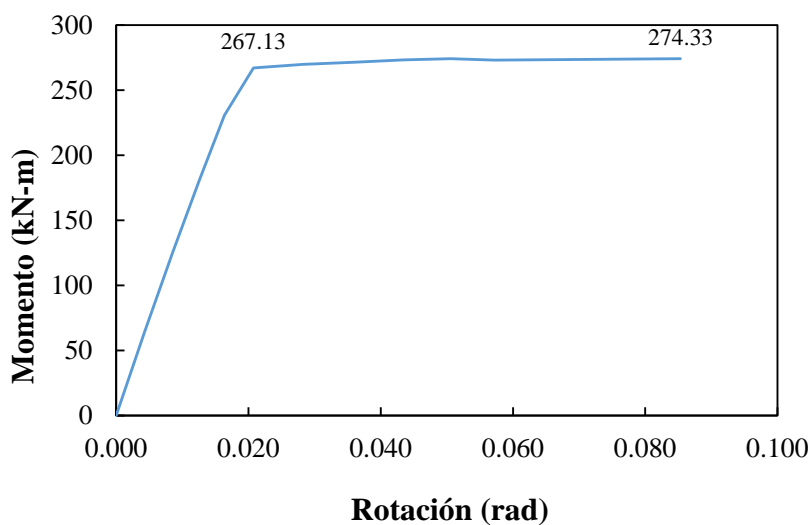


Figura 4.5. Constitutivo Momento – Rotación de la viga ejemplo.

El momento de fluencia del elemento es $M_y = 267.13 \text{ kNm}$, que si lo igualamos a $PL/4$ y despejamos P , obtenemos la carga para la cual el sistema se vuelve inestable, que es $P = 427.41 \text{ kN}$.

4.2 Túnel

El túnel está sujeto a una carga no uniforme (carga de ovalización), la cual puede descomponerse en una carga uniforme y una de ovalización. Si observamos el comportamiento del túnel bajo estas cargas por separado, se puede inferir que la carga uniforme (la cual representa la presión del suelo sobre el túnel debido a que éste se encuentra a una determinada profundidad respecto a la superficie) provoca que el anillo se deforme concéntricamente. No obstante, esta deformación es muy pequeña puesto que el anillo es extremadamente rígido cuando trabaja a compresión.

Por otra parte, cuando se empieza a aplicar la carga de ovalización (la cual representa una carga adicional en la clave y la cubeta y una relajación en los hastiales debido a las características propias del suelo), el anillo se empieza a acortar en el sentido vertical y a alargar en el horizontal. Cabe mencionar que estas deformaciones son considerablemente más grandes que las provocadas por la carga uniforme, dado que el anillo muestra un mal comportamiento a flexión. El anillo se deformará hasta que se formen las articulaciones necesarias para provocar el mecanismo de colapso. Estas articulaciones pueden formarse en las dovelas o en las juntas longitudinales, cuando se alcance en alguno de estos el momento de fluencia, que en el caso de las dovelas está definido por las características de la sección transversal, y en las juntas por la relación propuesta por Janssen (1983), la cual se basa en una prueba experimental de juntas planas.

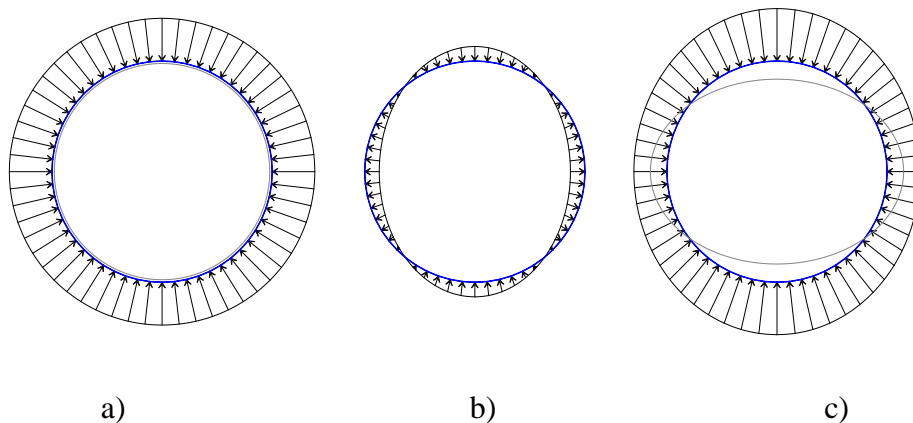


Figura 4.6. a) carga uniforme; b) carga de ovalización y c) carga total

PARTE III

MODELADO NUMÉRICO

Capítulo 5. Modelado numérico

En este capítulo se abordará primeramente el ejemplo de la viga que ilustra el mecanismo de colapso de un sistema y, además, se explicarán algunas otras herramientas de modelado que nos ofrece el ANSYS que nos ayudarán posteriormente a reproducir y entender lo resultados del modelo experimental a escala del túnel Botlek Railway y el modelo experimental del túnel ensayado por ICA. Además, se propone un modelo numérico para analizar la influencia de la interacción entre anillos y el revestimiento secundario en la capacidad global de un túnel dovelado.

5.1 Viga

La viga del ejemplo se discretizó con 20 nodos, con los cuales se formaron 10 elementos viga y 9 elementos resorte rotacional (Figura 5.1). Los elementos viga se representan con elementos BEAM3, que tienen capacidad de transmitir fuerzas axiales, cortantes y momentos flexionantes, y los resortes rotacionales se modelaron con elementos COMBIN39, a los que se le asigna un modelo constitutivo momento-rotación.

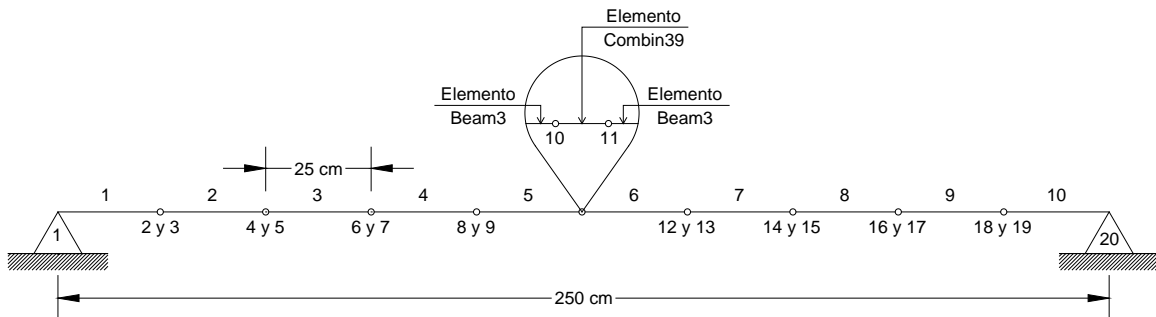


Figura 5.1. Discretización de la viga ejemplo en ANSYS.

Es importante mencionar que para definir el elemento COMBIN39, el programa ANSYS pide dos nodos, y estos no deben de estar en el mismo lugar en el espacio (es decir, no deben estar encimados). Al definirlos de esta manera, queda un espacio entre dos elementos viga consecutivos y, dado que el elemento resorte solo tiene rigidez rotacional, el sistema se vuelve inestable, puesto que no pueden transmitirse fuerzas axiales ni cortantes. La manera en que se soluciona este problema, es acoplando los grados de libertad UX y UY, y dejando desacoplado el grado de libertad ROTZ. De esta manera se da continuidad al elemento (dándole la capacidad de transmitir fuerzas axiales y cortantes), y el comportamiento a flexión queda controlado por los resortes de rigidez rotacional (Figura 5.2).

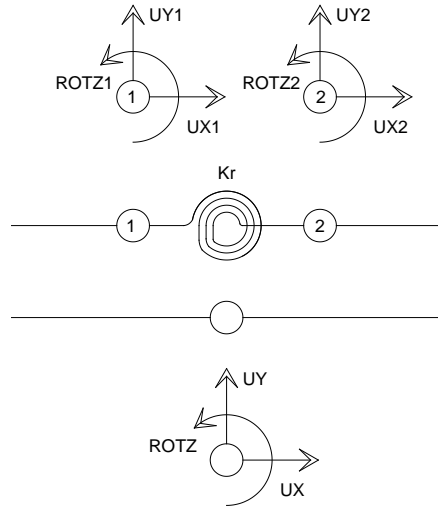


Figura 5.2. Acoplamiento de los grados de libertad.

Una vez que se han definido estos parámetros, se aplica intencionalmente una carga gradual de 500 kN (mayor a $M_y = 427.41$ kNm) para provocar el colapso de la viga (Se aplican 100 pasos de carga los cuales están expresados como porcentajes de la unidad). Al correr el programa, nos dice que la solución no converge en el paso de carga 88 porque hay rotaciones excesivas en el nodo 11 (nodo al centro del claro donde se aplica la carga), lo que indica que el sistema ha colapsado.

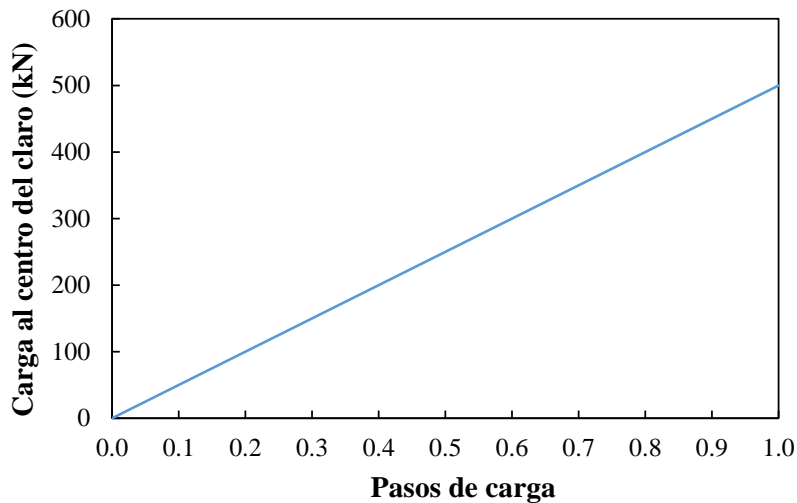


Figura 5.3. Carga incremental aplicada a la viga ejemplo.

Al revisar la carga correspondiente a este paso de carga, se observa que $P = 440$ kN, la cual está generando un momento al centro del claro de 274 kNm, que corresponde al M_u de la ley constitutiva que se definió para el comportamiento del resorte rotacional. Retrocediendo en el modelo unos pasos de carga más hasta donde ocurre el momento de fluencia ($M_y = 267.13$ kNm), se observa que éste ocurre en el paso de carga 86, el cual corresponde a una carga $P = 428$ kN, la cual es prácticamente igual a la que se definió analíticamente ($P_y =$

427.41 kN), indicando que el modelo está correctamente representado, puesto que los resortes son los que están controlando el comportamiento a flexión del elemento y, en este caso, del sistema. En la Figura 5.4 se observa la curva de capacidad de la viga al centro del claro.

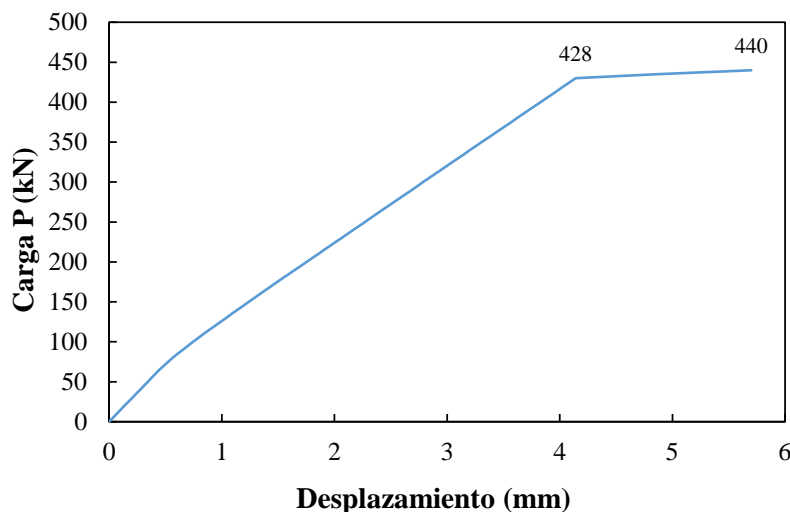


Figura 5.4. Curva carga – desplazamiento de la viga ejemplo.

Dado que en el modelo de la prueba experimental a escala del túnel Botlek Railway (BRT) se aplicarán cargas por etapas y reversibles (de las cuales no se está seguro si generan deformaciones residuales), se realizó una segunda prueba a la viga del ejemplo, donde se aplica una carga en dos etapas: una de carga y una de descarga, como se muestra en la Figura 5.5.

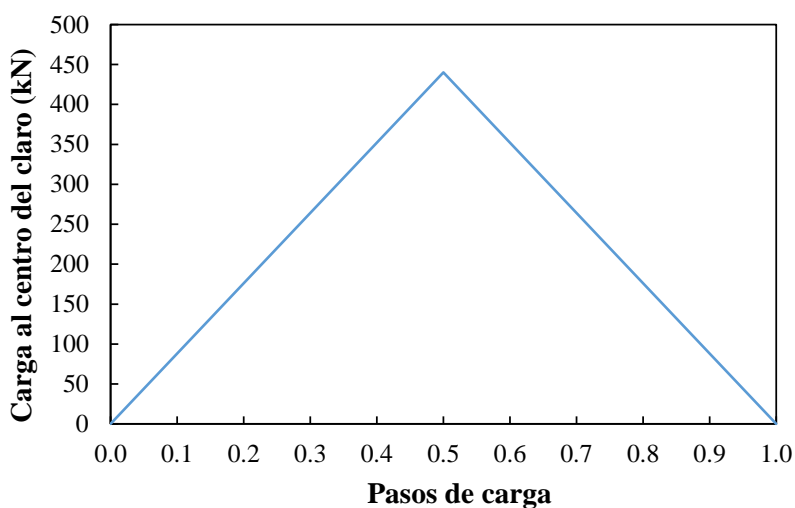


Figura 5.5. Carga y descargada aplicadas a la viga ejemplo.

Del ejemplo anterior se determinó que la carga que genera el colapso del sistema (Cuando se alcanza $M_u = 274$ kNm) es $P = 440$ kN, así que en este segundo ejemplo se aplicó una

carga $P = 438 \text{ kNm}$ (suficiente para pasar M_y pero sin rebasar M_u), y después se descargó, con lo cual deberíamos de tener deformaciones residuales. Los resultados del programa ANSYS concuerdan con lo esperado (ver Figura 5.6).

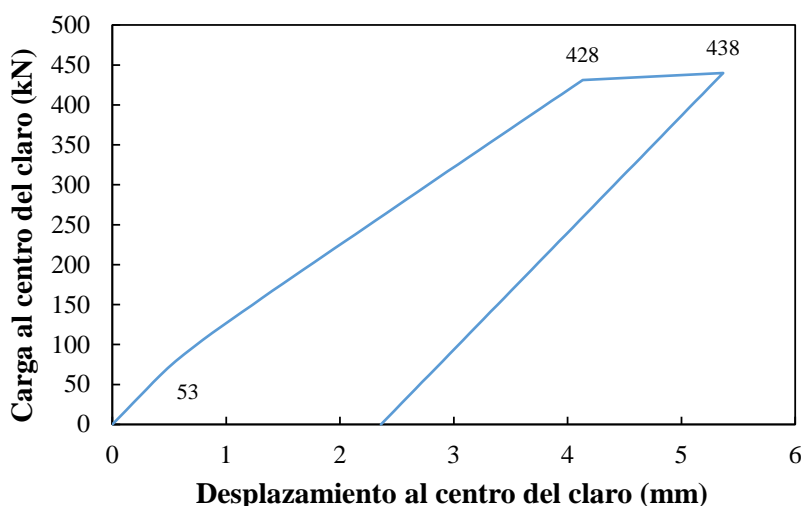


Figura 5.6. Curva carga – desplazamiento para la segunda función de carga y descarga.

5.2 Túnel Botlek Railway

Como una primera etapa de modelado, se analizaron los tres anillos del modelo experimental por separado, para ver el comportamiento aislado de cada uno de estos. Posteriormente, se analizaron los tres anillos trabajando en conjunto considerando las cargas del experimento C01 (interacción fuerte entre anillos), y después se analizaron en conjunto considerando las cargas del experimento C02 (interacción débil entre anillos).

5.2.1 Modelado de anillos aislados

5.2.1.1 Discretización

El túnel se discretiza con 60 nodos, los cuales definen 30 elementos viga (BEAM3) y 29 elementos resorte rotacional (COMBIN39), de los cuales 21 llevan asignado el comportamiento a flexión de las dovelas (K_{rd}), y los 8 restantes el de las juntas longitudinales (K_{rj}), como se muestra en la Figura 5.7, donde D-n indica el número de dovela y J-n el número de junta.

Al igual que en el ejemplo de la viga, se acoplaron los grados de libertad UX y UY, y se desacopló el grado de libertad ROTZ. De esta manera se da continuidad a los elementos viga (dándoles la capacidad de transmitir fuerzas axiales y cortantes), y el comportamiento a flexión queda controlado por los resortes de rigidez rotacional.

En la clave y en la cubeta se restringe el grado de libertad en “X” y se dejan libres el desplazamiento en “Y” y la rotación en “Z”. En los hastiales se restringe el grado de libertad en “Y”, y se dejan libres el desplazamiento en “X” y la rotación en “Z”. De esta manera se representan los gatos hidráulicos que se utilizaron en esos puntos para evitar desplazamientos de cuerpo rígido.

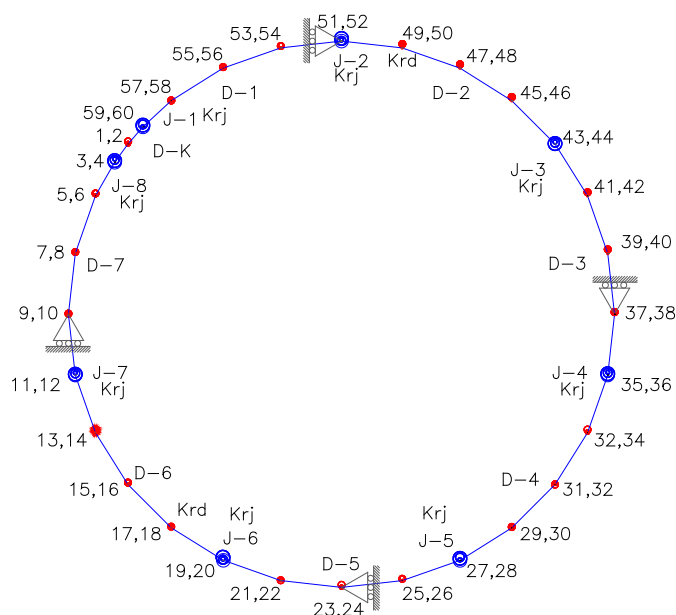


Figura 5.7. Discretización del anillo central del BRT

5.2.1.2 Leyes constitutivas

La ley constitutiva momento-rotación de las dovelas queda definida con las características de la sección transversal de la dovela, descritas en el trabajo de T.G. van der Waart van Gulik (2010). La sección transversal es $b \times h = 150 \times 40$ cm, el acero de refuerzo en el lecho superior e inferior es $A_s = 9.72 \text{ cm}^2$, como se muestra en la Figura 5.8. Las propiedades mecánicas del concreto son: el módulo de elasticidad es $E_c = 33,500 \text{ MPa}$ y el esfuerzo a compresión es $f'_c = 32 \text{ MPa}$. Las propiedades mecánicas del acero de refuerzo son: módulo de elasticidad $E_s = 200,000 \text{ MPa}$ y el esfuerzo de fluencia es $f_y = 435 \text{ MPa}$. La carga axial actuante en la dovela se calculó con la fórmula (B.13)(B.4) y es $N = 3040.80 \text{ kN}$.

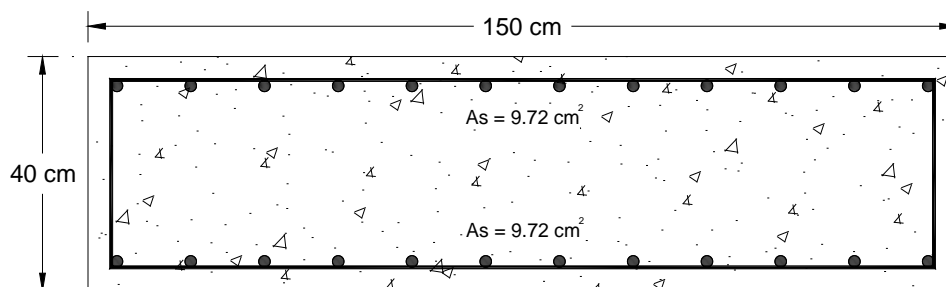


Figura 5.8. Sección transversal de las dovelas del BRT

Con los valores descritos en el párrafo anterior, se calcula la ley constitutiva momento-rotación de la dovela de concreto, mostrada en la Figura 5.9.

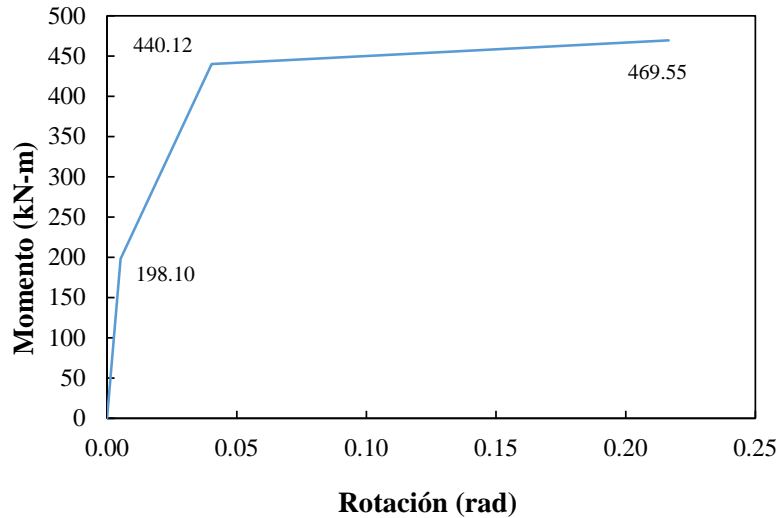


Figura 5.9. Ley constitutiva momento rotación de las dovelas del BRT

La ley constitutiva momento-rotación de las juntas longitudinales queda definida con la relación propuesta por Jansen (1983), y se muestra en la Figura 5.10.

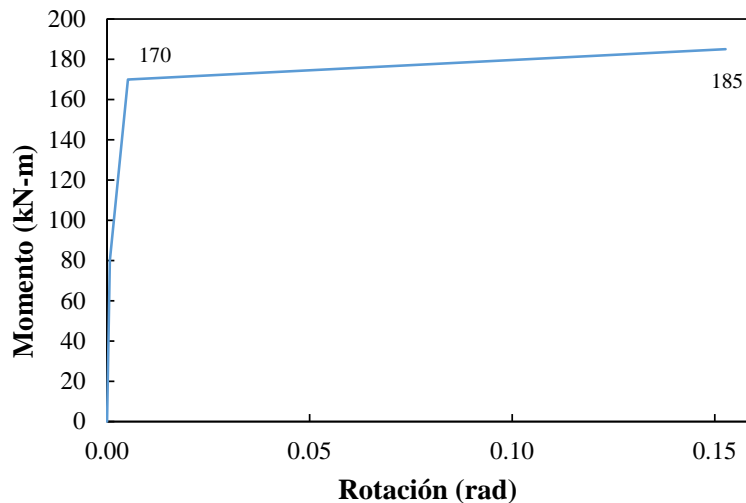


Figura 5.10. Ley constitutiva momento rotación de las juntas longitudinales del BRT

5.2.1.3 Cargas

Carga uniforme: La carga uniforme del experimento $\sigma_{\text{rad}} = 448 \text{ kN/m}^2$, se distribuyó a cargas puntuales radiales para aplicarse por los 28 gatos hidráulicos por anillo. Entonces se aplicaron 28 fuerzas radiales de 660 kN en cada uno de los anillos para simular la carga uniforme.

Carga axial: Como se analizan anillos aislados, no se consideraron cargas axiales ni sus efectos (fricción y acoplamiento mecánico entre anillos).

Carga de ovalización: Después de aplicar la carga uniforme, se aplica gradualmente la carga de ovalización con incrementos o decrementos de las fuerzas de la carga uniforme, para lo cual se utilizan funciones que describen la variación de éstas. Esta carga se aplicó hasta provocar el colapso del sistema, que fue a una carga de ovalización de ± 25.5 kN en los puntos más críticos (clave, cubeta y hastiales). En la Figura 5.11 se muestran las cargas totales aplicadas al modelo numérico.

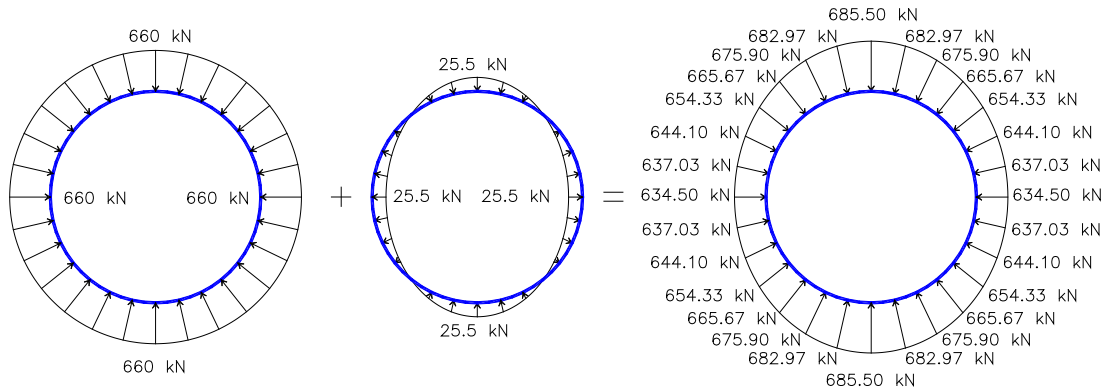


Figura 5.11. Cargas aplicadas al modelo experimental del BRT

5.2.1.4 Resultados

Se calcula el desplazamiento promedio causado por la carga de ovalización de los cuatro puntos críticos (clave, cubeta y hastiales) de cada uno de los anillos y, de estos tres, se obtiene nuevamente el promedio. Este desplazamiento promedio se grafica contra la carga de ovalización y de esta manera, se obtiene la curva de capacidad del modelo numérico del túnel considerando una interacción *nula* entre anillos. La curva de capacidad obtenida del modelo numérico se compara con la del modelo experimental que considera una baja interacción entre anillos (C02).

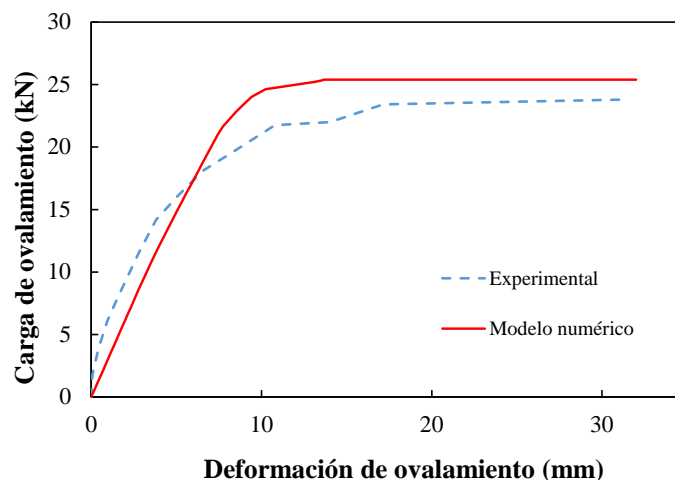


Figura 5.12. Curva de capacidad del anillo central aislado

Como se observa en las curvas, el modelo numérico muestra un comportamiento similar a la prueba experimental. Sin embargo, el modelo numérico sobreestima la capacidad del anillo experimental en un 7% aproximadamente. Esto se debe a que el modelo numérico se cargó sin considerar el daño provocado por el experimento C01 que, como se verá más adelante, tiene ligeras repercusiones en la capacidad del sistema como lo muestran los resultados del experimento C02.

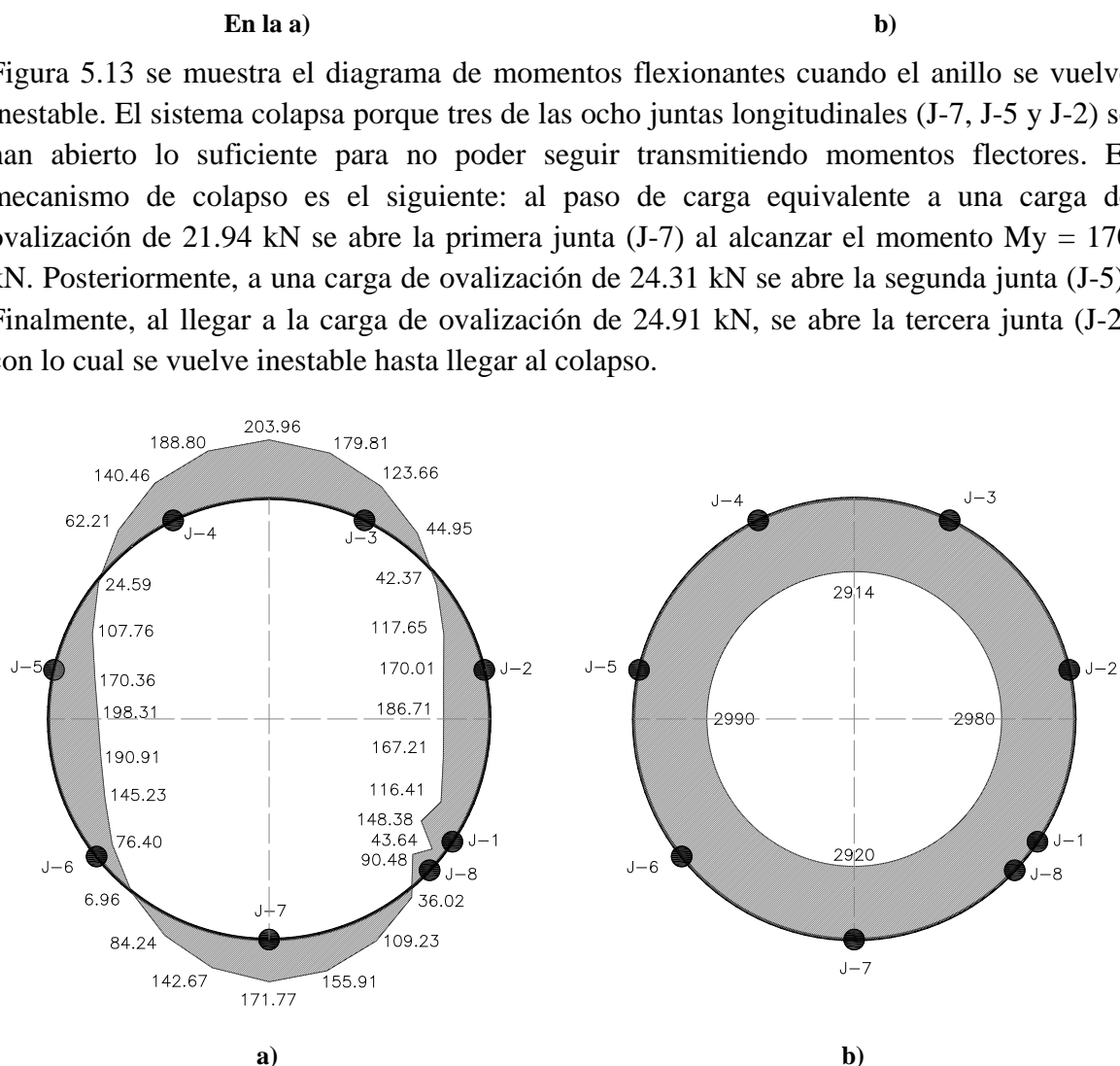


Figura 5.13. Elementos mecánicos en el anillo central aislado: a) momento y b) carga axial

5.2.2 Modelado del experimento C01

5.2.2.1 Discretización

La discretización se realizó de la misma manera que en los anillos aislados, sólo que se colocaron los tres anillos en el mismo modelo, teniendo un total de 180 nodos, los cuales definen 90 elementos viga (BEAM3) y 87 elementos resorte rotacional (COMBIN39), de los cuales 63 llevan asignado el comportamiento a flexión de las dovelas (Krd), y los 24

restantes el de las juntas longitudinales (K_{rj}). Además, en este modelo se agregaron elementos resortes longitudinales (COMBIN39) para simular el efecto de la carga axial aplicada en esta parte del experimento (K_{f1}), como se muestra en la Figura 5.14.

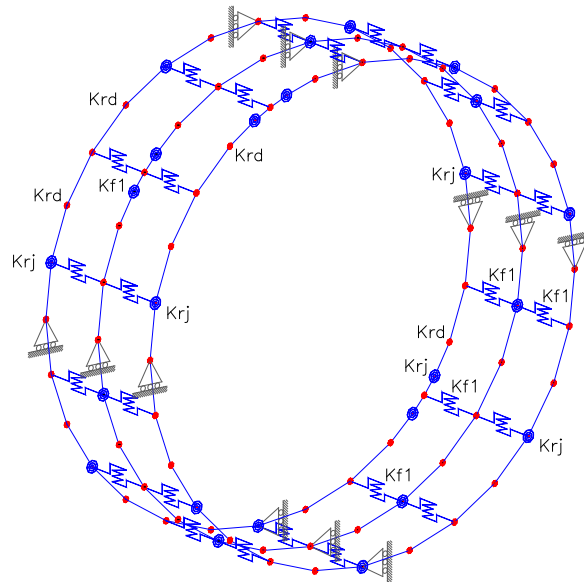


Figura 5.14. Discretización del experimento C01

5.2.2.2 Leyes constitutivas

Se utilizaron las mismas leyes constitutivas de los anillos aislados de la sección 5.2.1. Adicionalmente, se agregó un nuevo elemento, un resorte de rigidez traslacional (COMBIN39, K_{f1}), cuya ley constitutiva se muestra en la Figura 5.15, calculado para una carga axial $N = 11,200$ kN, un coeficiente de fricción $\mu = 0.8$, repartidos en 14 puntos de aplicación (ubicación de los gatos hidráulicos), y repartidos a su vez en 2 nodos, obteniéndose un cortante $V_{\max} = 320$ kN, y una rigidez $K = 100,000$ kN/m.

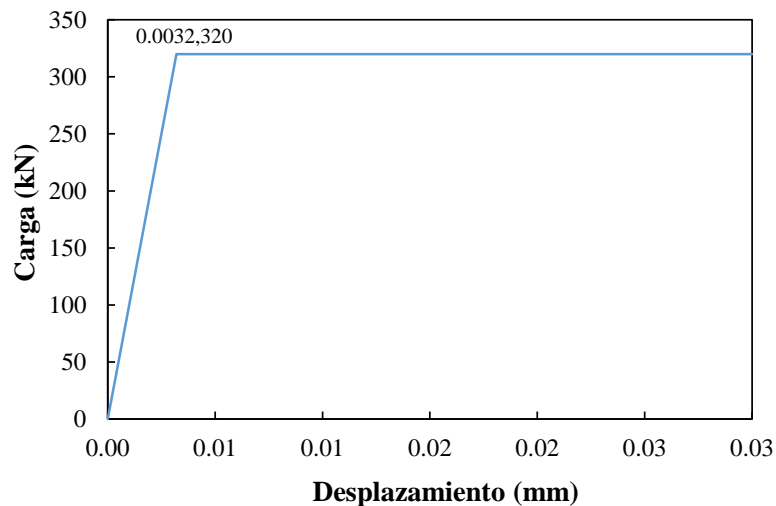


Figura 5.15. Modelo constitutivo carga – desplazamiento para resorte de interacción entre anillos (C01).

5.2.2.3 Cargas

Carga uniforme: Se aplicaron 28 fuerzas radiales de 660 kN en cada uno de los anillos para simular la carga uniforme.

Carga axial: Como se modela con elementos que trabajan coplanarmente, no se pueden aplicar fuerzas perpendiculares al plano del modelo. La manera de aplicar estas fuerzas al modelo, fue transformándolas en fuerzas de fricción que sí trabajan en el plano de interés, ya que éstas trabajan en dirección perpendicular a la carga aplicada. Dichas fuerzas de fricción se modelaron con resortes de rigidez traslacional (COMBIN14).

Carga de ovalización: Después de aplicar la carga uniforme, se aplica gradualmente la carga de ovalización con incrementos o decrementos de las fuerzas de la carga uniforme, para lo cual se utilizan funciones que describen la aplicación de éstas. Esta carga se aplicó hasta provocar el colapso del sistema, que fue de ± 36.4 kN en los puntos más críticos (clave, cubeta y hastiales).

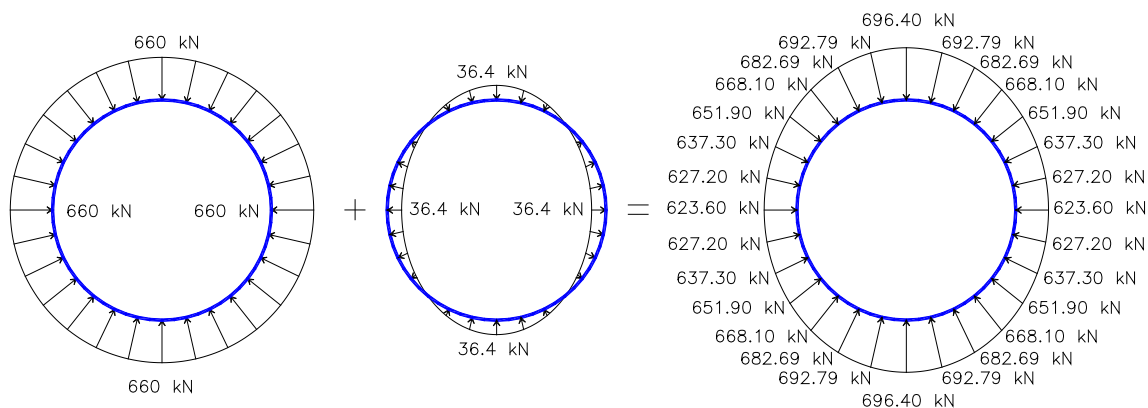


Figura 5.16. Cargas aplicadas al modelo experimental del BRT (C01)

5.2.2.4 Resultados

Se calcula el desplazamiento promedio causado por la carga de ovalización de los cuatro puntos críticos (clave, cubeta y hastiales) de cada uno de los anillos y, de estos tres, se obtiene nuevamente el promedio. Este desplazamiento promedio se grafica contra la carga de ovalización y con esto, se obtiene la curva de capacidad del modelo experimental del túnel considerando una interacción *fuerte* entre anillos. La curva de capacidad obtenida del modelo numérico se compara con la de la prueba experimental que considera una alta interacción entre anillos (C01), como se muestra en la Figura 5.17.

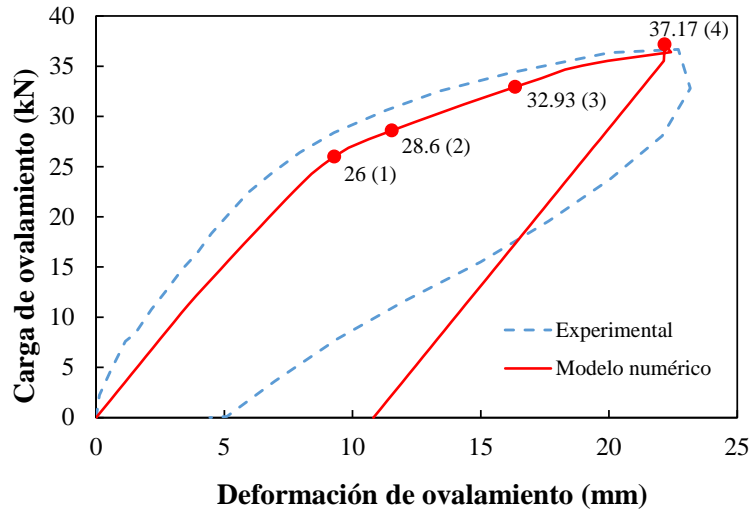


Figura 5.17. Curva de capacidad promedio de los anillos en el experimento C01

Como se observa en las curvas, el modelo numérico muestra un comportamiento similar a la prueba experimental. Ambas han perdido prácticamente toda su rigidez a una carga de ovalización de aproximadamente 37 kN.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.17, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-4 del anillo superior y la junta J-7 del anillo inferior a una carga de ovalización de 26 kN.
- 2.- Se articula la junta J-7 del anillo central, la junta J-2 del anillo superior, la junta J-2 y J-5 del anillo inferior a una carga de ovalización de 28.6 kN.
- 3.- Se articula la junta J-2 y J-5 del anillo central a una carga de ovalización de 32.93 kN.
- 4.- Se articulan las juntas J-6, J-7 y J-8 del anillo superior, y las juntas J-3 y J-4 en el anillo inferior. Además de las juntas, se articularon también dos dovelas en el anillo central, entre las juntas J-3 y J-4, y entre las juntas J-5 y J-6 a una carga de ovalización de 37.17 kN.

De las curvas se destacan algunos puntos importantes:

- El conjunto de anillos ha sufrido daño. Esto se observa en el comportamiento de la curva de capacidad. En la etapa de carga, se observa claramente que el sistema pierde gradualmente prácticamente toda su rigidez, incursionado fuertemente en el intervalo inelástico, pues el sistema ha sufrido daño. Además, una vez retirada toda la carga, se observa una deformación residual, la cual es también indicativo de daño. Aquí es importante mencionar que cuando se ha incursionado fuertemente en el intervalo inelástico de cualquier sistema, es difícil definir el comportamiento de la rama de descarga, pues cada material presenta una pendiente distinta de descarga;

sin embargo, el programa sólo ofrece la opción de descargar con la misma pendiente de la rama elástica de carga, de ahí la diferencia entre ambas ramas.

- La interacción entre anillos tiene una gran influencia en la capacidad de carga del sistema. En el análisis de anillos aislados se observó que el mecanismo de colapso del sistema está dominado por la capacidad de las juntas longitudinales, pues estas tienen aproximadamente un 40% de la capacidad a flexión de las dovelas, y esto se ve claramente en el diagrama de momentos de los anillos. No obstante, cuando el sistema trabaja en conjunto, si una de las juntas falla, ese punto en el sistema sigue siendo estable ya que la sección de la dovela contigua (que tiene más capacidad que la junta) sirve de apoyo para resistir las cargas. Entonces, bajo estas condiciones (anillos trabajando en conjunto), la capacidad del sistema depende en gran medida de la resistencia de las dovelas.

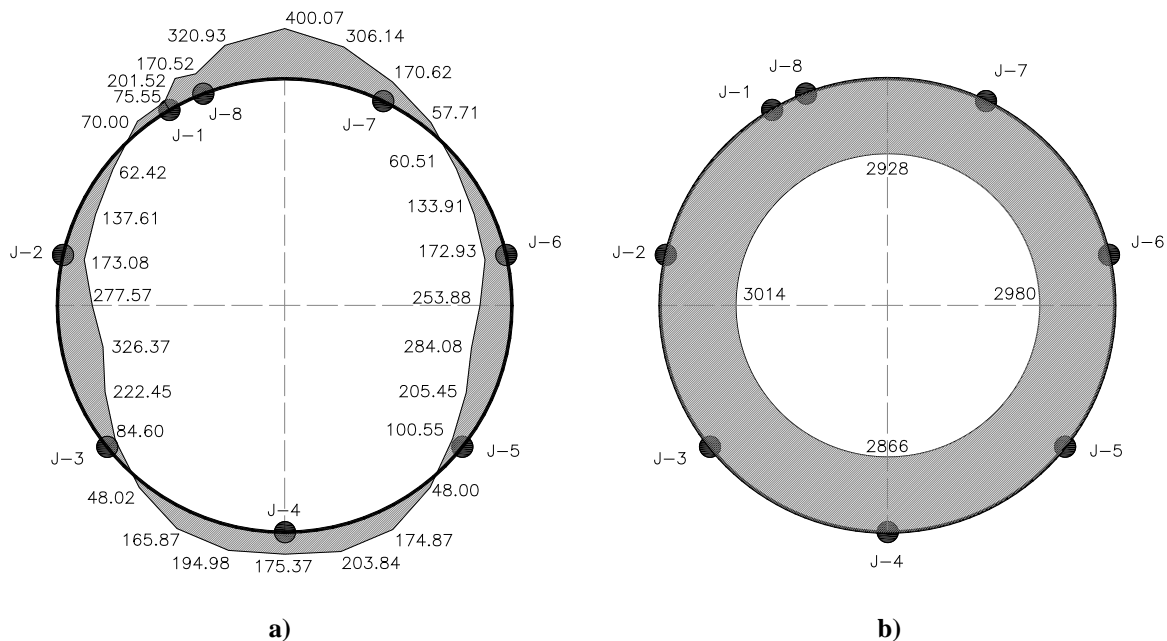


Figura 5.18. Elementos mecánicos en el anillo superior del experimento C01: a) momento y b) carga axial.

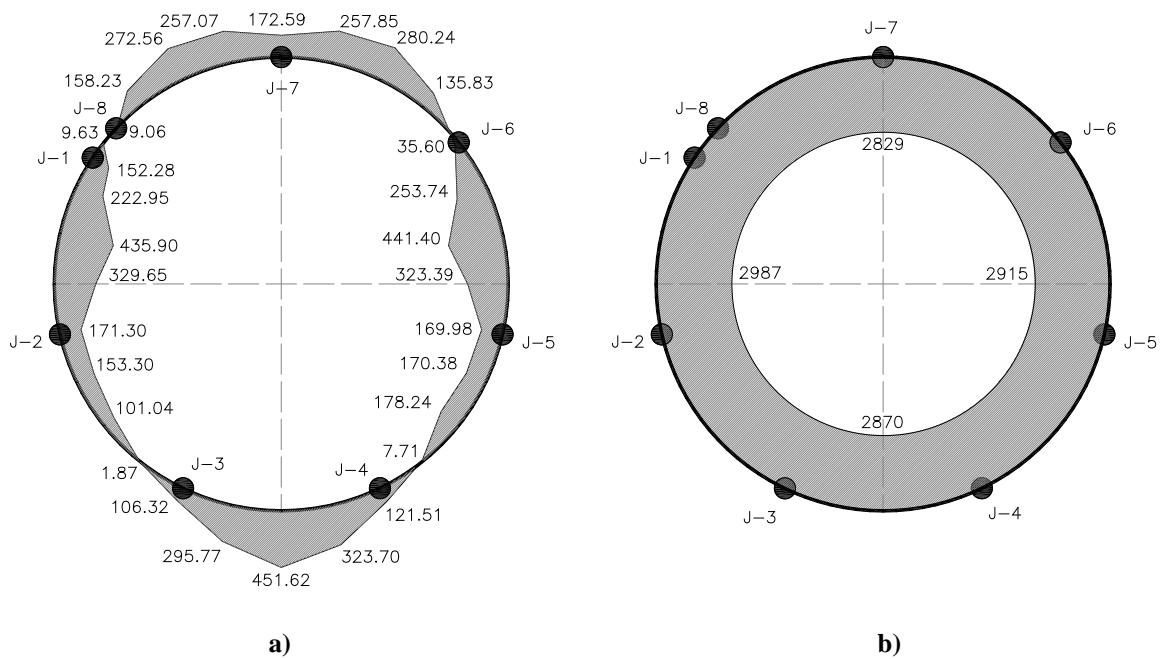


Figura 5.19. Elementos mecánicos en el anillo central del experimento C01: a) momento y b) carga axial.

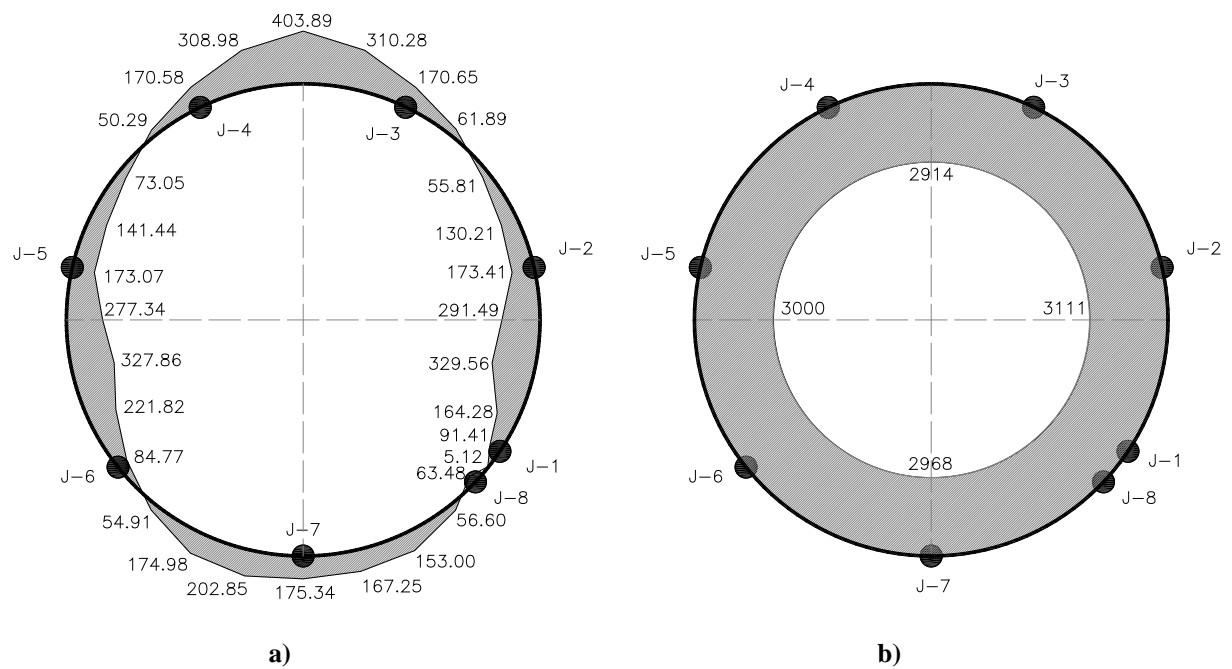


Figura 5.20. Elementos mecánicos en el anillo inferior del experimento C01: a) momento y b) carga axial.

5.2.3 Modelado del experimento C02

5.2.3.1 Discretización

Para este modelo se ocupó el archivo de resultados del experimento C01, de tal manera que se toma en cuenta el daño producto de la primera etapa de cargas. La discretización se realizó de la misma manera que en el modelo del experimento C01, descrita en la sección 5.2.2.1. Sin embargo, se modificó la ley constitutiva carga – desplazamiento de los elementos resortes longitudinales (COMBIN39) que simulan el efecto de la carga axial aplicada en esta parte del experimento (Kf2), como se muestra en la Figura 5.21.

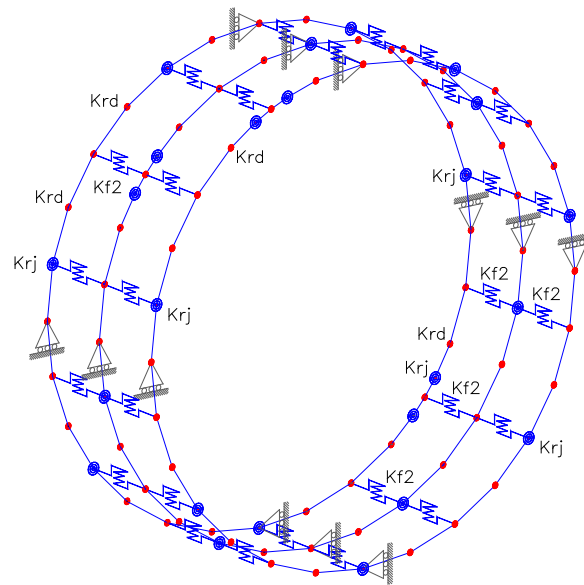


Figura 5.21. Discretización del experimento C02

5.2.3.2 Leyes constitutivas

Se utilizaron las mismas leyes constitutivas de los anillos aislados de la sección 5.2.2. Adicionalmente se agregó un nuevo elemento, un resorte de rigidez traslacional (COMBIN39, Kf1), cuya ley constitutiva se muestra en la Figura 5.22, calculada para una carga axial $N = 1,400 \text{ kN}$, un coeficiente de fricción $\mu = 0.8$, repartidos en 14 puntos de aplicación (ubicación de los gatos hidráulicos), y repartidos a su vez en 2 nodos, obteniéndose un cortante $V_{\max} = 40 \text{ kN}$, y una rigidez $K = 100,000 \text{ kN/m}$.

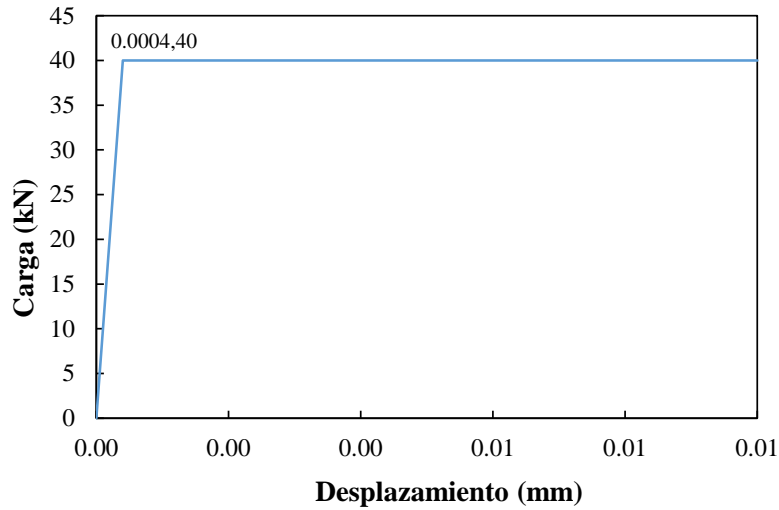


Figura 5.22. Ley constitutiva carga – desplazamiento para resorte de interacción entre anillos (C02).

5.2.3.3 Cargas

Carga uniforme: Se aplicaron 28 fuerzas radiales de 660 kN en cada uno de los anillos para simular la carga uniforme.

Carga axial: En esta parte del experimento se aplicó una carga axial baja, por lo tanto, los resortes de rigidez traslacional que simulan la fricción en las juntas entre anillos tienen una rigidez muy baja, de tal manera que los anillos trabajan prácticamente de manera aislada.

Carga de ovalización: Después de aplicar la carga uniforme, se aplica gradualmente la carga de ovalización con incrementos o decrementos de las fuerzas de la carga uniforme, para lo cual se utilizan funciones que describen la aplicación de éstas. Esta carga se aplicó hasta provocar el colapso del sistema, que fue de ± 22.5 kN en los puntos más críticos (clave, cubeta y hastiales).

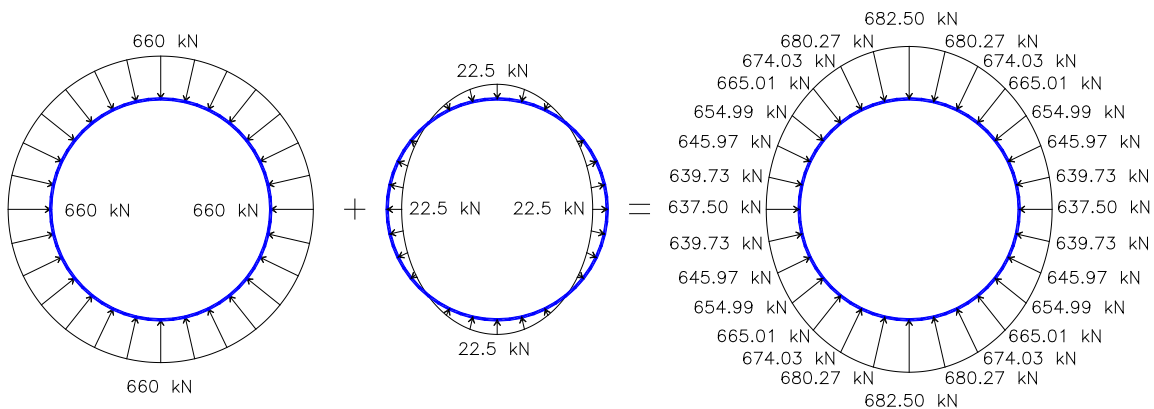


Figura 5.23. Cargas aplicadas al modelo experimental del BRT (C02)

5.2.3.4 Resultados

Se calcula el desplazamiento promedio causado por la carga de ovalización de los cuatro puntos críticos (clave, cubeta y hastiales) de cada uno de los anillos y, de estos tres, se obtiene nuevamente el promedio. Este desplazamiento promedio se grafica contra la carga de ovalización y con esto, se obtiene la curva de capacidad del modelo experimental del túnel considerando una interacción *baja* entre anillos. La curva de capacidad obtenida del modelo numérico se compara con la de la prueba experimental que considera una baja interacción entre anillos (C02), como se muestra en la Figura 5.24.

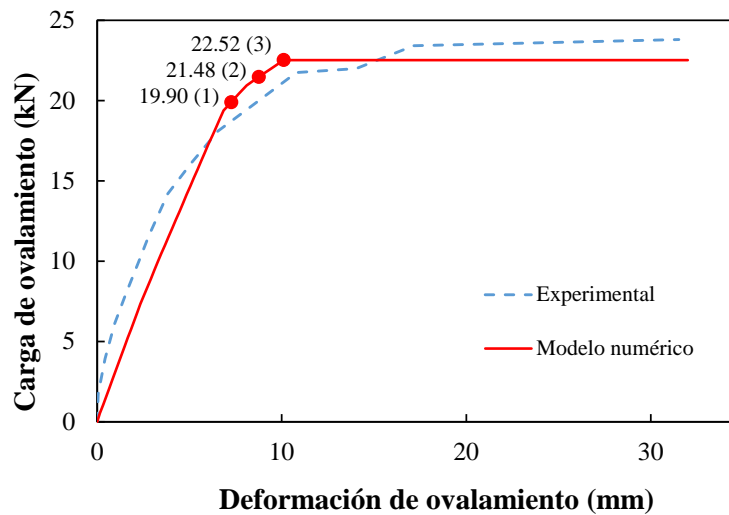


Figura 5.24. Curva de capacidad del anillo central en el experimento C02

Como se observa en las curvas, el modelo numérico muestra un comportamiento similar al modelo experimental.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.24, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-7 del anillo central a una carga de 19.90 kN;
- 2.- Se articula la junta J-5 del anillo inferior a una carga de 21.48 kN; y
- 3.- Se articula la junta J-5 del anillo central, la junta J-2 del anillo superior y la junta J-4 del anillo inferior.

De los resultados se concluye que el colapso del sistema en la segunda etapa de cargas se debe principalmente a dos razones:

- El daño provocado por la primera etapa de cargas. Como se puede observar en el estado inicial del sistema en la segunda etapa de cargas, existen deformaciones y momentos residuales que merman la capacidad original (sin daño) de las dovelas, pero principalmente de las juntas longitudinales.

- La baja interacción entre anillos. El sistema colapsa por la incapacidad del anillo intermedio de seguir transmitiendo momentos flexionantes (por la falla de cuatro de las ocho juntas longitudinales). Aunque los anillos inferior y superior aún son capaces de seguir resistiendo cargas, debido a la baja interacción existente el anillo central no puede “apoyarse” en los anillos contiguos y seguir resistiendo cargas después de ser incapaz de resistirlas por sí mismo.

5.3 Túnel con doble revestimiento de sección variable

El objetivo de los modelos que se describen en la presente sección es el de estimar la capacidad de un túnel dovelado con revestimiento secundario. Los resultados aquí obtenidos no se validaron con modelos experimentales; sin embargo, las leyes constitutivas y elementos finitos se validaron en la sección 5.2.

El anillo utilizado para los modelos numéricos realizados en la presente sección tiene 9.91 m de diámetro exterior y 9.11 m de diámetro interior como se muestra en la Figura 5.25. Las dovelas, D-n, tienen una sección transversal de 40 cm de altura y 150 cm de longitud. El anillo está formado por 7 dovelas y una dovela llave, por lo que se tienen 8 juntas longitudinales, J-n. El revestimiento secundario tiene un espesor no constante desde 20 cm hasta 110 cm en la zona de la cubeta.

En los modelos del túnel se analizó la influencia que tienen las juntas longitudinales, la interacción entre anillos y el revestimiento secundario en la capacidad y evolución del mecanismo de colapso de un túnel dovelado. Para estimar la influencia de cada uno de estos factores en la capacidad del túnel, se realizaron cuatro modelos diferentes: un anillo aislado, un anillo aislado con revestimiento secundario, tres anillos sin revestimiento secundario, y tres anillos con revestimiento secundario.

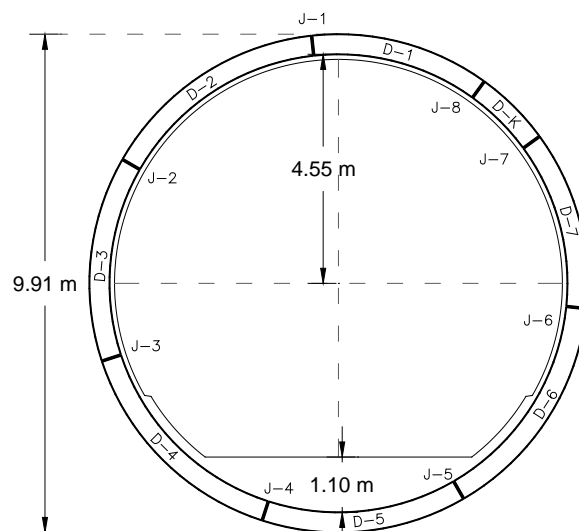


Figura 5.25. Dimensiones y características del anillo y revestimiento utilizados para el modelo numérico.

5.3.1 Modelo de anillo aislado

5.3.1.1 Discretización

El túnel se discretizó con 120 nodos, los cuales definen 60 elementos viga (BEAM3) y 59 elementos resorte rotacional (COMBIN39), de los cuales a 51 elementos se les asignó el comportamiento a flexión de las dovelas (Krd), y los 8 restantes el de las juntas longitudinales (Krk), como se muestra en la Figura 5.26, donde D-n indica el número de dovela y J-n el número de junta.

Al igual que en el ejemplo de la viga en la sección 5, en estos modelos del túnel se acoplaron los grados de libertad UX y UY, y se desacopló el grado de libertad ROTZ. De esta manera se da continuidad a los elementos viga (dándoles la capacidad de transmitir fuerzas axiales y cortantes), y el comportamiento a flexión queda controlado por los resortes de rigidez rotacional.

En la clave y en la cubeta del túnel se restringió el grado de libertad en dirección “X” y se dejan libres el desplazamiento en dirección “Y” y la rotación alrededor del eje “Z”. En los hastiales se restringió el grado de libertad en “Y”, y se permite el desplazamiento en “X” y la rotación en “Z”.

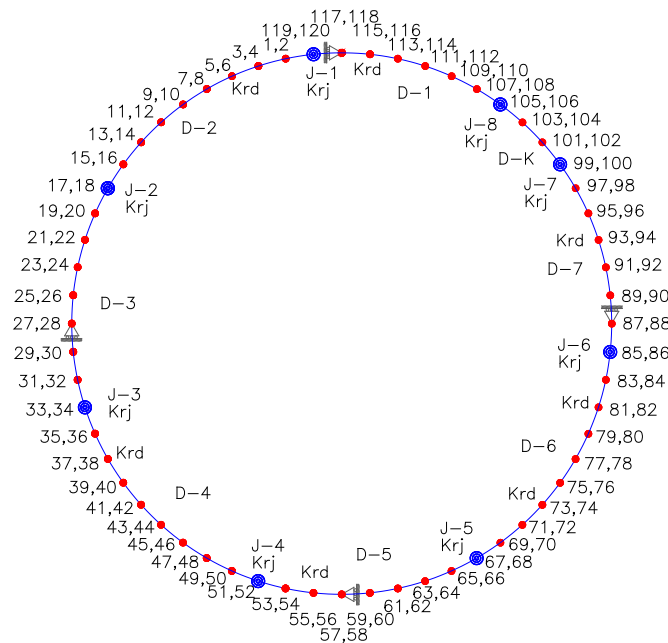


Figura 5.26. Discretización del anillo aislado sin revestimiento.

5.3.1.2 Leyes constitutivas

La ley constitutiva momento-rotación de las dovelas queda definida con las características de la sección transversal de la dovela tipo de la prueba experimental de un túnel a escala

real realizado por ICA, descritas por Tenorio (2016). La sección transversal es $b \times h = 150 \times 40$ cm, el acero de refuerzo en el lecho superior e inferior $A_s = 12.5 \text{ cm}^2$, como se muestra en la Figura 5.27. Las propiedades mecánicas del concreto son: el módulo de elasticidad $E_c = 33,500 \text{ MPa}$ y el esfuerzo a compresión $f'_c = 44 \text{ MPa}$. Las propiedades mecánicas del acero de refuerzo son: módulo de elasticidad $E_s = 200,000 \text{ MPa}$ y el esfuerzo de fluencia $f_y = 412 \text{ MPa}$, considerando un comportamiento elastoplástico. La carga axial actuante en la dovela es $N = 852 \text{ kN}$.

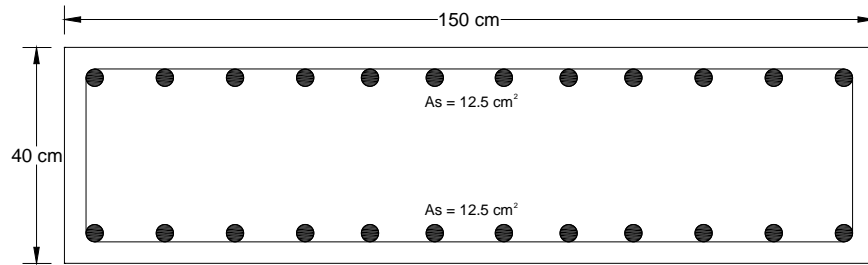


Figura 5.27. Sección transversal de dovela del modelo numérico.

Con las características descritas en el párrafo anterior, y siguiendo la metodología mostrada en el Apéndice A, se calculó el diagrama momento-rotación mostrado en la Figura 5.28.

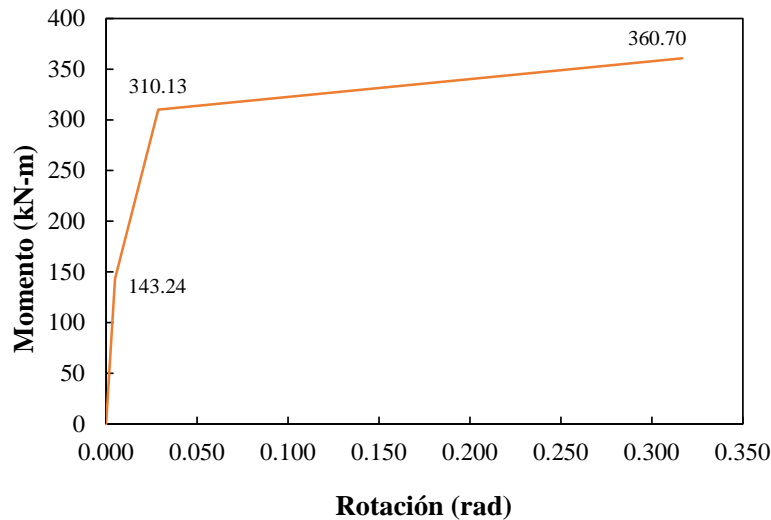


Figura 5.28. Modelo constitutivo momento-rotación de las dovelas del modelo numérico.

Para calcular la ley constitutiva momento-rotación de las juntas longitudinales, se utilizó la relación propuesta por Jansen (1983), descrita en la sección 2.2.1.1. La junta longitudinal tiene una altura $b = 17 \text{ cm}$ y una longitud $h = 1.39 \text{ m}$, y en esta actúa una carga axial $N = 852 \text{ kN}$. La ley constitutiva calculada se muestra en la Figura 5.29.

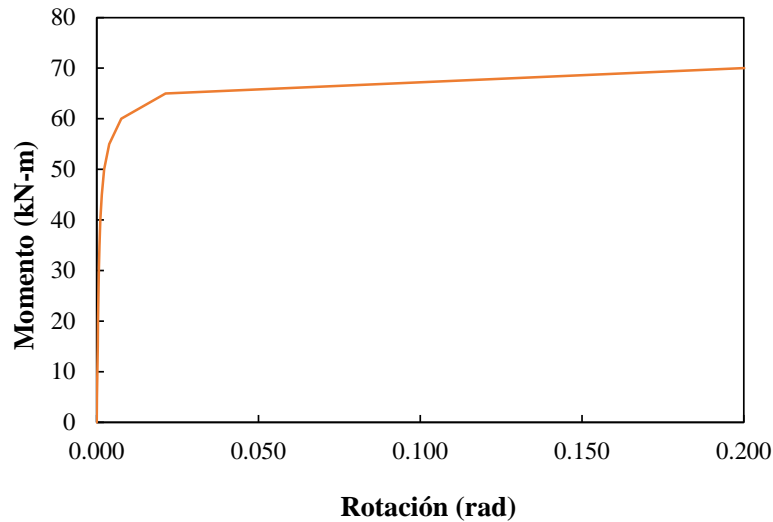


Figura 5.29. Modelo constitutivo momento-rotación de junta longitudinal del modelo numérico.

5.3.1.3 Cargas

Se aplicó una carga de ovalización con una relación $Ph/Pv=0.4$. Dicha carga se compone de una carga uniforme, la cual se aplica primero, y posteriormente se aplica la carga no uniforme de manera incremental hasta llevar el modelo numérico a la falla. Los puntos de aplicación de las cargas así como sus magnitudes se muestran en la Figura 5.30.

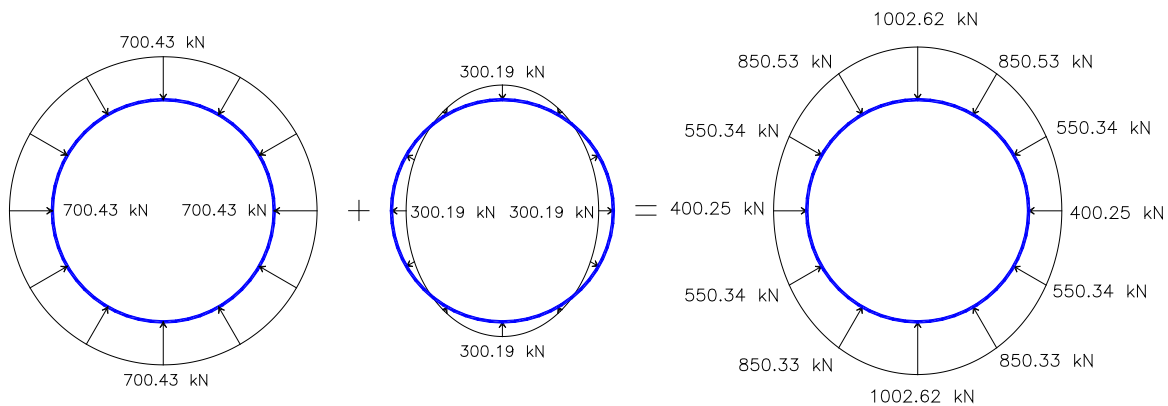


Figura 5.30. Cargas aplicadas al modelo numérico de anillo aislado sin revestimiento secundario.

5.3.1.4 Resultados

La curva de la carga contra el acortamiento vertical se muestra en la Figura 5.31, y la curva de la carga contra el alargamiento horizontal se muestra en la Figura 5.32, ambas curvas muestran la capacidad de carga del anillo aislado sin revestimiento secundario. Además, las curvas de capacidad en la clave y la cubeta del túnel se muestran en la Figura 5.33, donde se observa que el desplazamiento en la clave y en la cubeta es prácticamente el mismo,

puesto que en ambos puntos se tienen espesores de concreto y cuantías de acero iguales. La diferencia existente se atribuye a que no es simétrica la posición de las juntas longitudinales respecto a los puntos analizados. Como se observa en las curvas de las figuras 5.31 a 5.33, el comportamiento estructural de un anillo aislado sin revestimiento depende principalmente de la capacidad de las juntas longitudinales (considerando que el suelo circundante no brinda soporte).

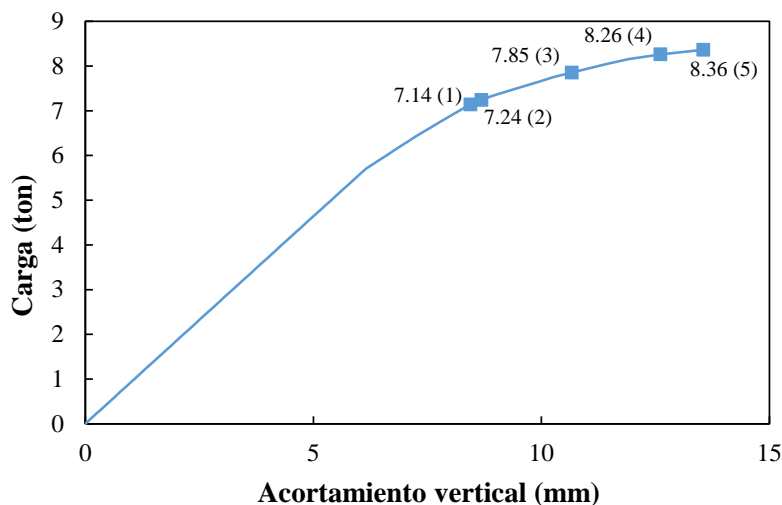


Figura 5.31. Curva de capacidad del anillo aislado sin revestimiento en el sentido vertical.

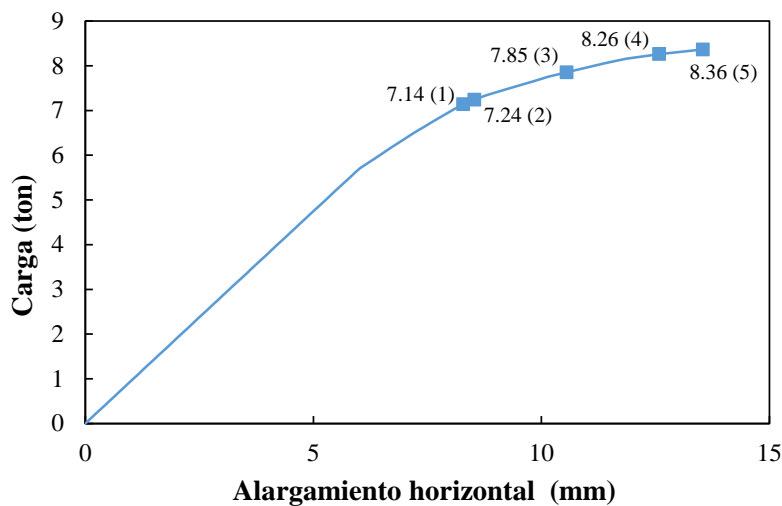


Figura 5.32. Curva de capacidad del anillo aislado sin revestimiento en el sentido horizontal.

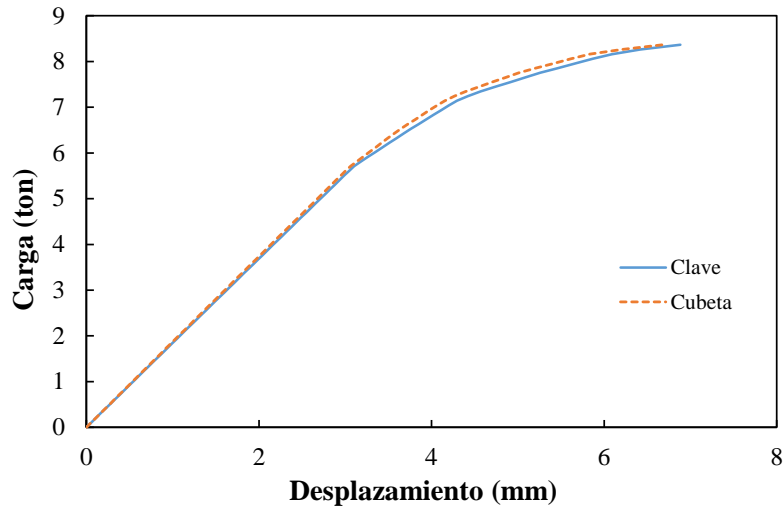


Figura 5.33. Curva de capacidad del anillo aislado sin revestimiento en clave y cubeta.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.34, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-6 a una carga de 7.14 t;
- 2.- Se articula la junta J-1 a una carga de 7.24 t;
- 3.- Se articula la junta J-3 a una carga de 7.85 t;
- 4.- Se articula la junta J-4 a una carga de 8.26 t; y
- 5.- Se articula la junta J-5 a una carga de 8.36 t;

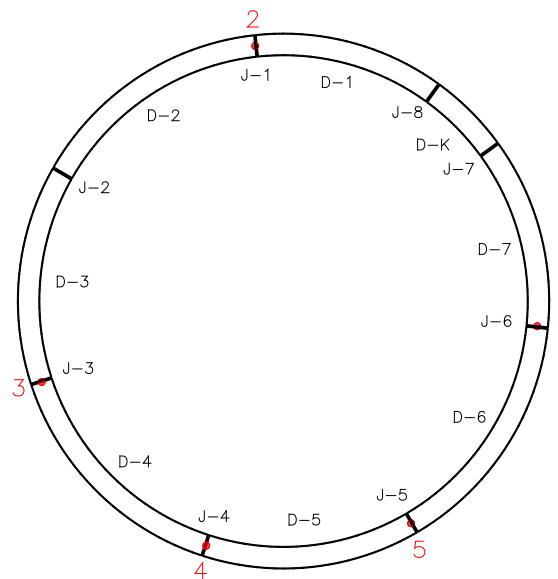


Figura 5.34. Mecanismo de colapso de un anillo aislado sin revestimiento secundario.

Los elementos mecánicos desarrollados en el anillo en el último paso de carga se muestran en la Figura 5.35, donde se observa que las dovelas no desarrollan su máxima capacidad a flexión, $M_p = 310 \text{ kN}$, pues el momento con mayor magnitud es de 115.13 kN en la cubeta; y lo mismo sucede con su capacidad a cortante. No obstante, 5 de las 8 juntas longitudinales, mostradas en el mecanismo de colapso en las Figura 5.31 y Figura 5.32, si logran incursionar en el intervalo no lineal, limitando la capacidad del anillo a la capacidad de éstas. De lo anterior se concluye que no es deseable que el anillo trabaje de manera aislada, puesto que su capacidad se limita a la capacidad de las juntas longitudinales, no aprovechando entonces la capacidad que pudieran desarrollar las dovelas.

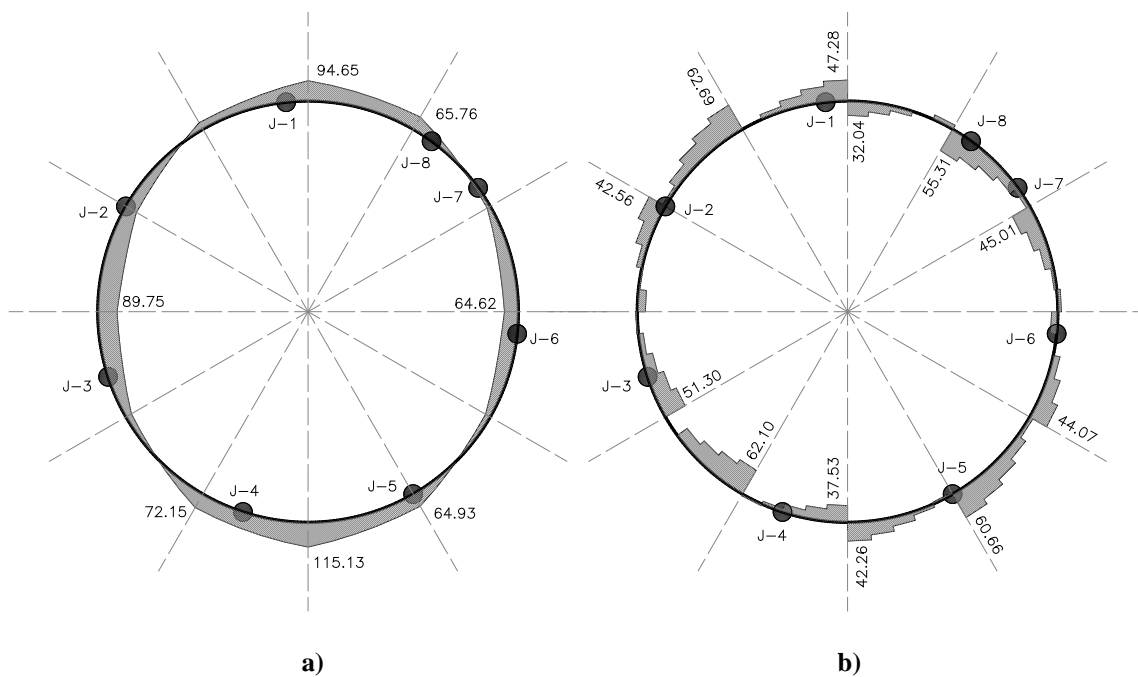


Figura 5.35. Elementos mecánicos en el anillo aislado sin revestimiento: a) Momento y b) Cortante.

5.3.2 Modelo de anillo aislado con revestimiento secundario

5.3.2.1 Discretización

El túnel se discretizó con 240 nodos, de los primeros 120 nodos (1-120), localizados en la parte externa del modelo (ver Figura 5.36), se definen 60 elementos viga Beam-D (BEAM3) y 59 elementos resorte rotacional (COMBIN39), de los cuales a 51 se les asignó el comportamiento a flexión de las dovelas (Krd), y a los 8 restantes el de las juntas longitudinales (Krij), donde D-n indica el número de dovela y J-n el número de junta. Con los siguientes 120 nodos (121-240), localizados en la parte interna del modelo (ver Figura 5.36), se definen 60 elementos viga Beam-R (BEAM3) de los cuales 40 tienen asignadas las propiedades del revestimiento secundario (Krr) con espesor de 20 cm, 8 las propiedades de 30 cm, 2 las propiedades de 45 cm, 2 las propiedades de 70 cm, 2 las propiedades de 87.5 cm, 2 las propiedades de 100 cm, 2 las propiedades de 107.5 cm y 2 las propiedades de 110 cm. Los 59 elementos resorte rotacional (COMBIN39) ubicados entre cada elemento viga tienen asignados los modelos constitutivos momento rotación calculados para cada uno de los espesores del revestimiento según su ubicación en la periferia del mismo, siendo 39 resortes correspondientes a un espesor de 20 cm, 10 de 30 cm, 2 de 60 cm, 2 de 80 cm, 2 de 95 cm, 2 de 105 cm y 2 de 110 cm.

En el modelo numérico presentado en esta sección, se considera una interacción perfecta entre el anillo de dovelas y el revestimiento secundario, no considerando el deslizamiento o separación entre ambos revestimientos. Aun así, las secciones tanto del anillo como del revestimiento trabajan como dos secciones unidas (una de 40 cm y otra de 20 cm), y no como una sola sección (una de 60 cm). Para generar esta interacción en el modelo, se colocaron resortes de rigidez traslacional (COMBIN14) entre cada uno de los puntos del anillo y del revestimiento, tanto en dirección “X” (Krix) como en dirección “Y” (Kriy), asignándoles una rigidez suficientemente grande para tener elementos rígidos que unen ambos revestimientos.

Al igual que en el ejemplo de la viga en la sección 5, en estos modelos del túnel se acoplaron los grados de libertad UX y UY, y se desacopló el grado de libertad ROTZ. De esta manera se da continuidad a los elementos viga (dándoles la capacidad de transmitir fuerzas axiales y cortantes), y el comportamiento a flexión queda controlado por los resortes de rigidez rotacional.

En la clave y en la cubeta del túnel se restringió el grado de libertad en dirección “X” y se dejan libres el desplazamiento en dirección “Y” y la rotación alrededor del eje “Z”. En los hastiales se restringió el grado de libertad en “Y”, y se permite el desplazamiento en “X” y la rotación en “Z”.

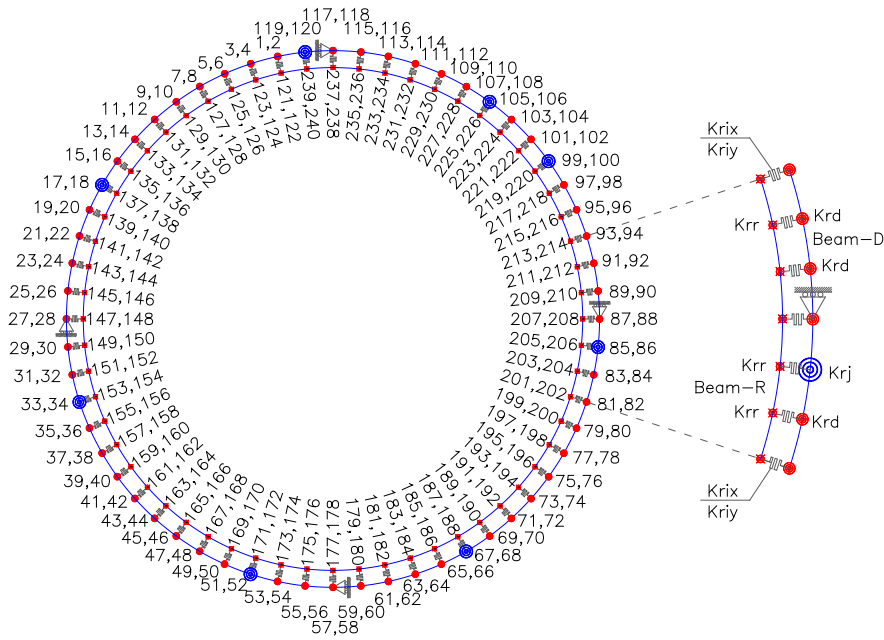


Figura 5.36. Discretización del anillo aislado con revestimiento.

5.3.2.2 Leyes constitutivas

La ley constitutiva momento rotación asignada a las dovelas es el mismo que se presentó en la sección 5.3.1.2, al igual que la ley constitutiva momento rotación asignada a las juntas longitudinales.

Según su ubicación en la periferia del anillo, se calculó una ley constitutiva momento-rotación para cada variación del espesor del revestimiento secundario. A diferencia de las dovelas (que tienen la misma cuantía de acero en ambos lechos), se calculó la ley constitutiva correspondiente para ambos casos de flexión, positiva (ver Figura 5.38) y negativa (ver Figura 5.39), debido a que el revestimiento tiene sólo un lecho de acero. En la Figura 5.37 se muestra el armado de acero para el revestimiento secundario.

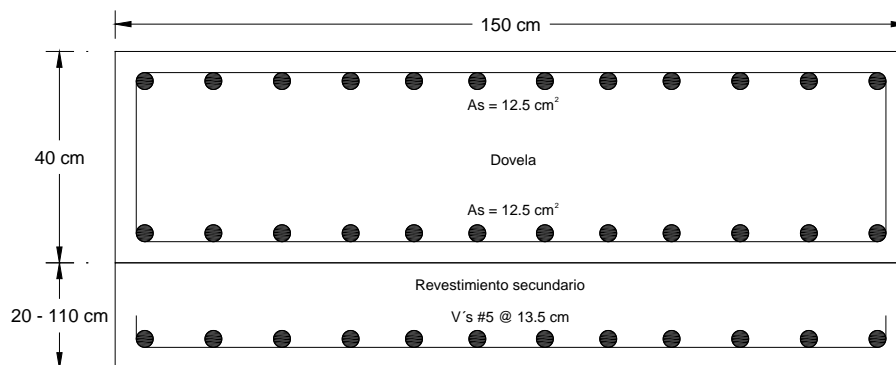


Figura 5.37. Armado del revestimiento secundario en el modelo numérico.

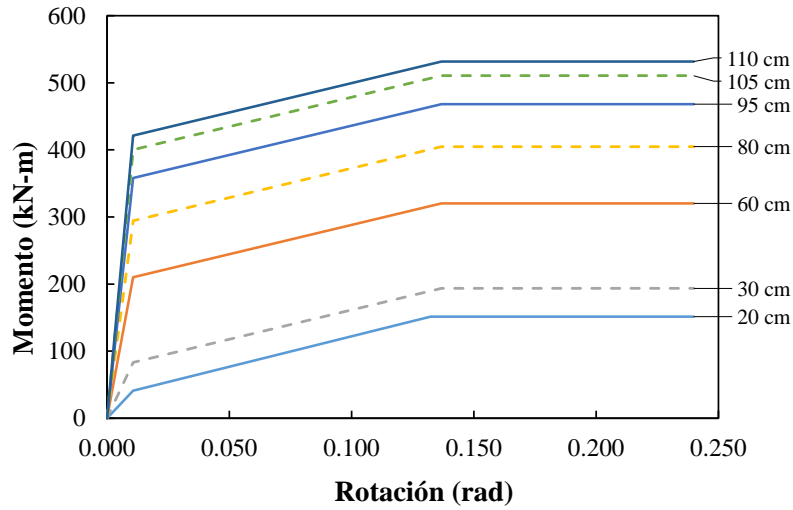


Figura 5.38. Leyes constitutivas del revestimiento secundario según su espesor (flexión positiva).

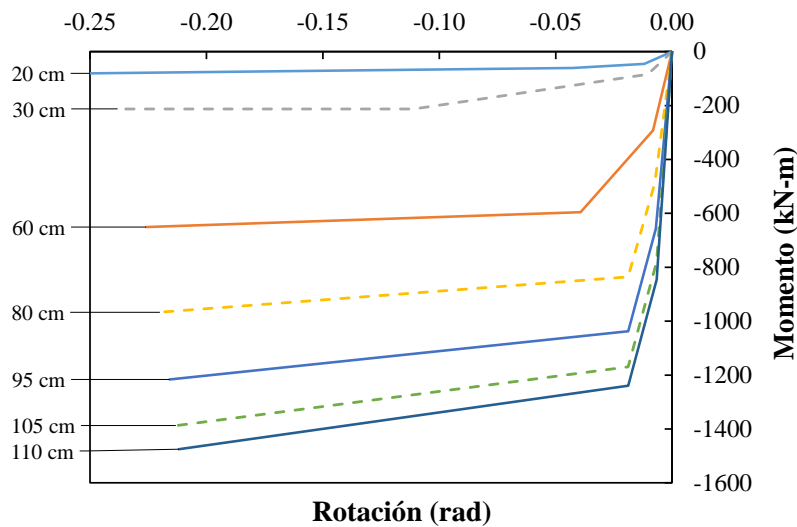


Figura 5.39. Leyes constitutivas del revestimiento secundario según su espesor (flexión negativa).

Para el caso de los resortes de rigidez traslacional (COMBIN14), colocados para generar la interacción entre el anillo de dovelas y el revestimiento secundario en dirección “X” y “Y”, se asignó la ley constitutiva carga-deformación mostrada en la Figura 5.40, cuya rigidez es constante y de una magnitud de 100,000 kN/m, con la cual se considera que se genera una transmisión íntegra de fuerzas entre ambos revestimientos.

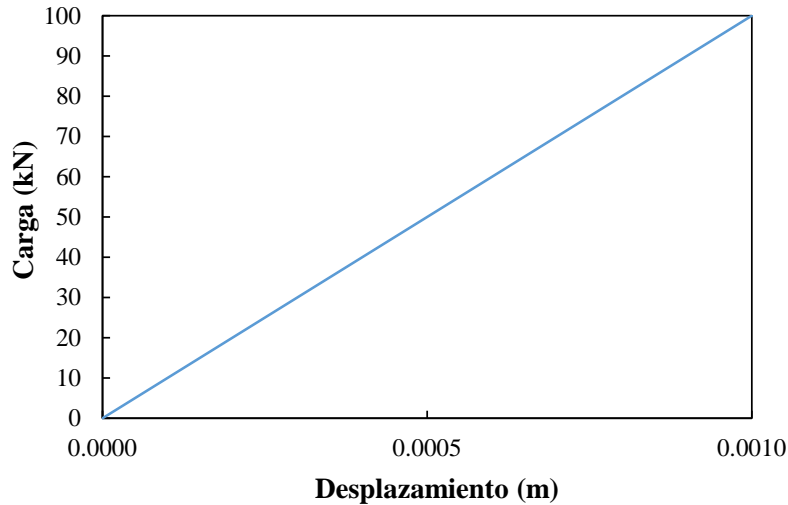


Figura 5.40. Ley constitutiva carga – desplazamiento para resortes de interacción entre revestimientos.

5.3.2.3 Cargas

Se aplicó una carga de ovalización con una relación $P_h/P_v=0.4$. Dicha carga se compone de una carga uniforme, la cual se aplicó primero y, posteriormente, se aplicó incrementalmente la carga de ovalización hasta llevar el modelo numérico a la falla. Los puntos de aplicación de las cargas así como sus magnitudes se muestran en la Figura 5.41.

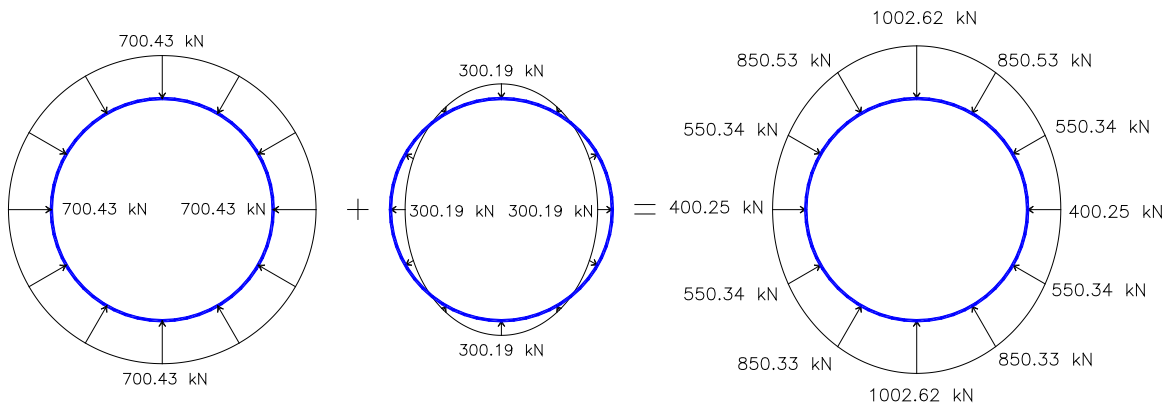


Figura 5.41. Cargas aplicadas al modelo numérico de anillo aislado con revestimiento secundario.

5.3.2.4 Resultados

La curva de la carga contra el acortamiento vertical se muestra en la Figura 5.42, y la curva de la carga contra el alargamiento horizontal se muestra en la Figura 5.43, ambas curvas muestran la capacidad de carga del anillo aislado con revestimiento secundario. Además, las curvas de capacidad en la clave y la cubeta del túnel se muestran en la Figura 5.44, donde se observa que la presencia del revestimiento secundario con un mayor espesor en la cubeta incrementa considerablemente la rigidez del anillo en ese punto. No obstante, las

fuerzas por cortante se incrementan, por lo que debe realizarse un detallado adecuado para el cortante en estas zonas del túnel. Como se observa en las curvas de las figuras 5.42 a 5.44, la capacidad estructural del anillo aislado se incrementó en un 400% aproximadamente con la presencia del revestimiento secundario. Primero comienzan a articularse las juntas, y posteriormente estas se apoyan en el revestimiento secundario, manteniendo estables esos puntos en el anillo.

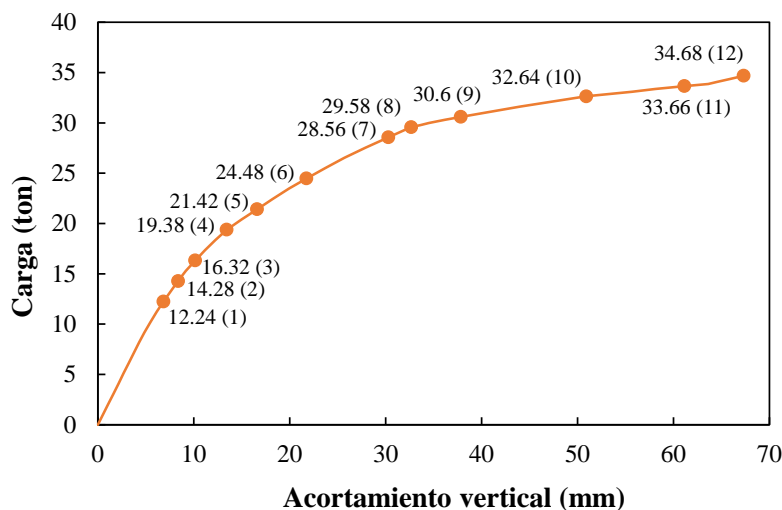


Figura 5.42. Curva de capacidad del anillo aislado con revestimiento secundario en el sentido vertical.

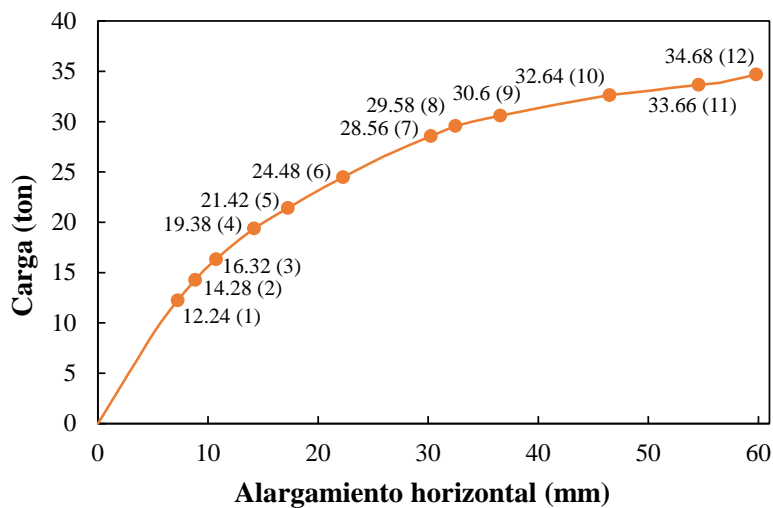


Figura 5.43. Curva de capacidad del anillo aislado con revestimiento secundario en el sentido horizontal.

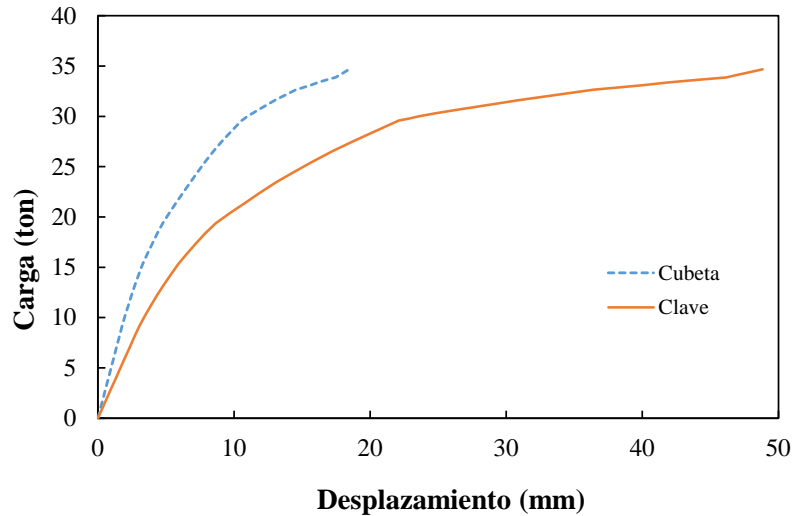


Figura 5.44. Curva de capacidad del anillo aislado con revestimiento en clave y cubeta.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.45, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-1 a una carga de 12.24 t;
- 2.- Se articula la junta J-6 a una carga de 14.28 t;
- 3.- Se articula la junta J-5 a una carga de 16.32 t;
- 4.- Se articula la junta J-2 a una carga de 19.38 t;
- 5.- Se articula la junta J-3 a una carga de 21.42 t;
- 6.- Se articula la junta J-7 y el revestimiento secundario en el hastial derecho de 20 cm a una carga de 24.48 t;
- 7.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm a la altura de la junta J-2 a una carga de 28.56 t;
- 8.- Se articula el revestimiento secundario en la cubeta de 60 cm a una carga de 29.58 t;
- 9.- Se articula el revestimiento secundario en la cubeta de 80 cm a una carga de 30.6 t;
- 10.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm a la altura de la junta J-6 y cerca de la junta J-6 y en la cubeta de 110 cm a una carga de 32.64 t;
- 11.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm cerca de la junta J-6 y en la cubeta de 80 cm a una carga de 33.66 t; y
- 12.- Se articula el revestimiento secundario en la cubeta de 60 cm a una carga de 34.68 t.

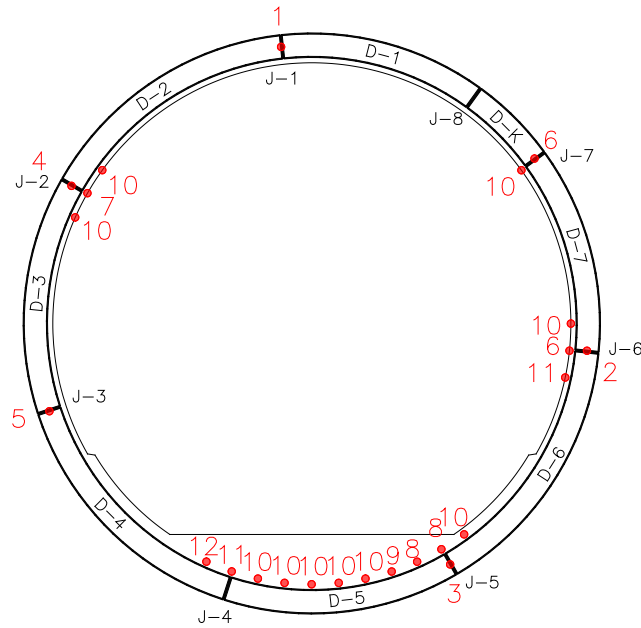


Figura 5.45. Mecanismo de colapso de un anillo aislado con revestimiento secundario

Los elementos mecánicos desarrollados en el anillo en el último paso de carga se muestran en las figuras 5.46 y 5.47. Como se observa en la Figura 5.46, cuando las juntas longitudinales alcanzan su máxima capacidad, es el revestimiento secundario quien toma las flexiones. No obstante, entre las juntas, son las dovelas quienes toman la mayor parte de las fuerzas y no el revestimiento secundario, lo cual se debe a que las dovelas tienen una mayor rigidez, y toman entonces la mayor parte de las cargas. Sin embargo, en la zona de la cubeta, es el revestimiento quien toma la mayor parte de las fuerzas, y no las dovelas. Esto se atribuye claramente a la mayor rigidez de esta zona del revestimiento respecto a la de las dovelas. Además, en la Figura 5.47 se observa que existe una concentración de fuerzas cortantes en la zona de transición de espesores del revestimiento secundario.

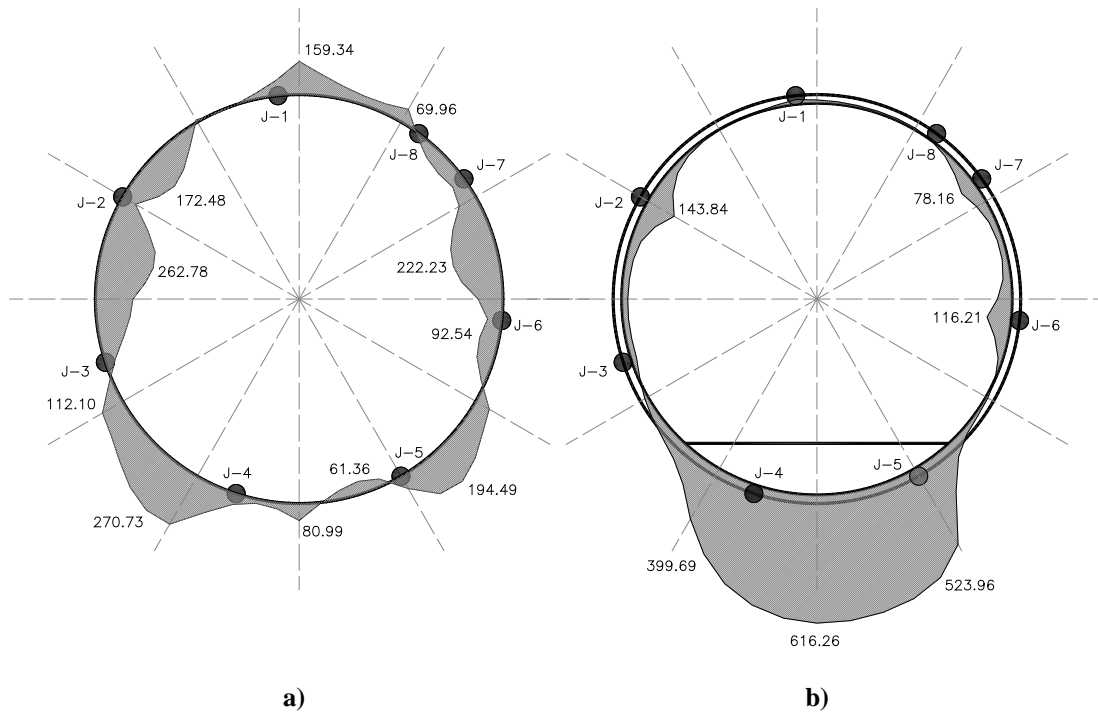


Figura 5.46. Momentos en el anillo aislado con revestimiento secundario: a) anillo y b) revestimiento secundario.

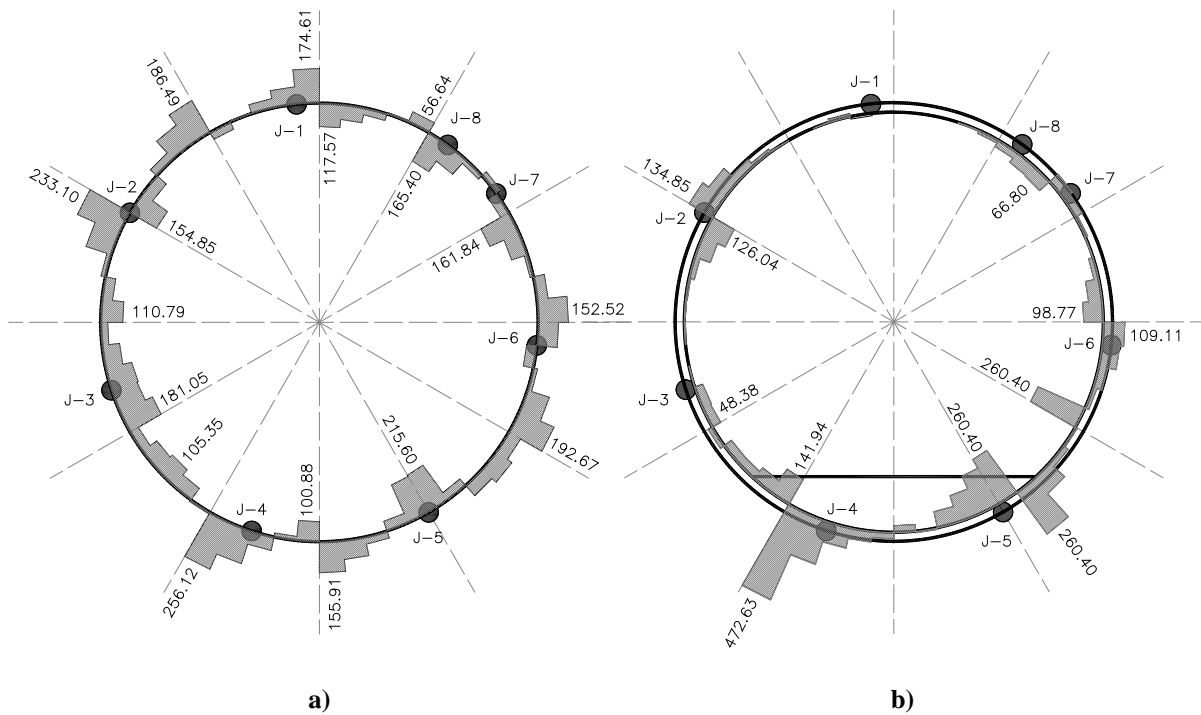


Figura 5.47. Cortantes en el anillo aislado con revestimiento secundario: a) anillo y b) revestimiento secundario.

5.3.3 Modelo de anillos sin revestimiento secundario

5.3.3.1 Discretización

La discretización se realizó de la misma manera que en el anillo aislado, sólo que se colocaron los tres anillos en el mismo modelo, teniendo un total de 360 nodos, los cuales definen 180 elementos viga (BEAM3) y 177 elementos resorte rotacional (COMBIN39), de los cuales 153 tienen asignado el comportamiento a flexión de las dovelas (K_{rd}), y los 24 restantes el de las juntas longitudinales (K_{rj}). Además, en este modelo se agregaron elementos resortes longitudinales (COMBIN14) para modelar la interacción entre anillos por acoplamiento mecánico ($K_{a_{x,y}}$), como se muestra en la Figura 5.48.

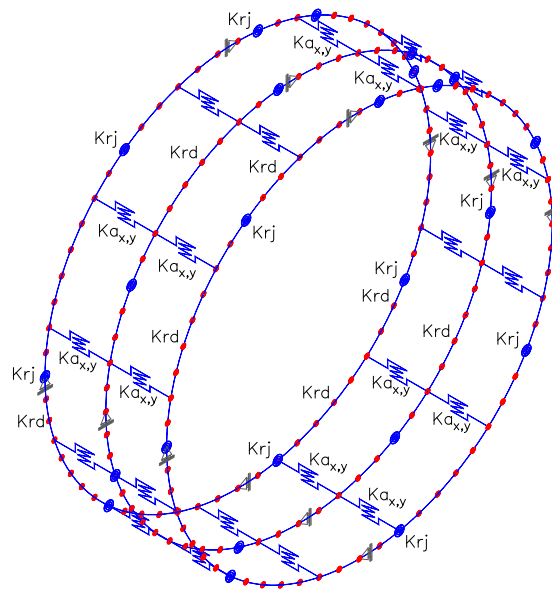


Figura 5.48. Discretización de anillos sin revestimiento.

5.3.3.2 Leyes constitutivas

La ley constitutiva momento rotación asignada a las dovelas es la misma que se presentó en la sección 5.3.1.2, al igual que la ley constitutiva momento-rotación asignada a las juntas longitudinales. En el caso de los resortes traslacionales que generan la interacción entre anillos por acoplamiento mecánico ($K_{a_{x,y}}$), se les asignó la ley constitutiva mostrada en la Figura 5.49, cuya rigidez asegura la transmisión de fuerzas de un anillo a otro.

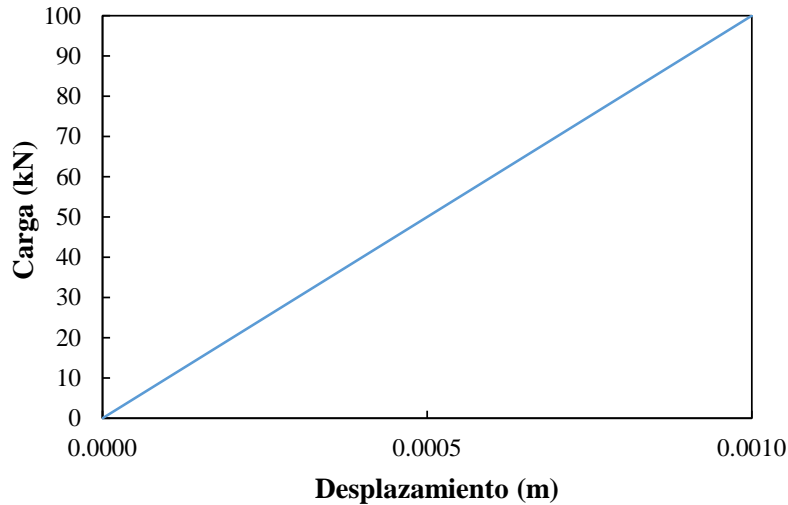


Figura 5.49. Ley constitutiva carga – desplazamiento para los resortes de interacción entre anillos por acoplamiento mecánico.

5.3.3.3 Cargas

Se aplicó una carga de ovalización con una relación $P_h/P_v=0.4$. Dicha carga se compone de una carga uniforme, la cual se aplicó primero y, posteriormente, se aplicó incrementalmente la carga de ovalización hasta la ocurrencia de la falla en el modelo numérico. Los puntos de aplicación de las cargas así como sus magnitudes se muestran en la Figura 5.50. Es importante mencionar que las cargas mostradas sólo se aplicaron al anillo central, y no a los anillos contiguos.

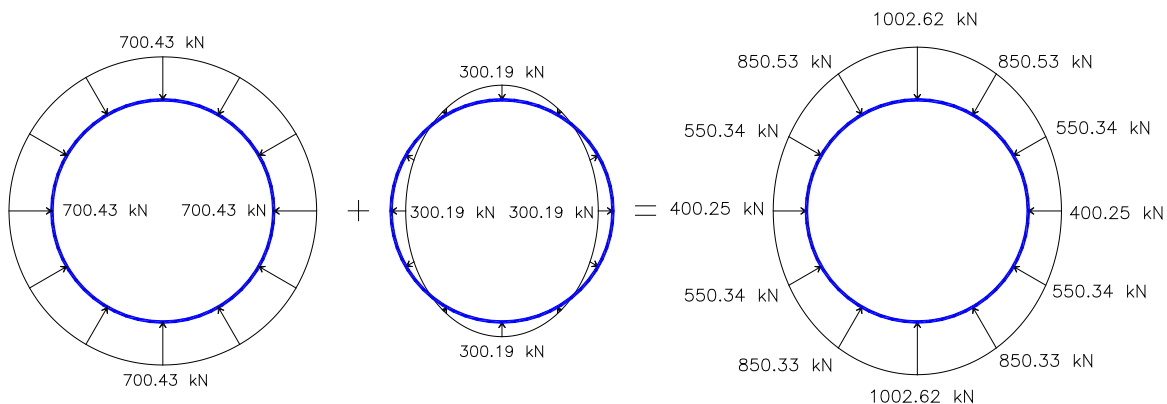


Figura 5.50. Cargas aplicadas al modelo numérico de anillos sin revestimiento secundario.

5.3.3.4 Resultados

La curva de la carga contra el acortamiento vertical se muestra en la Figura 5.42, y la curva de la carga contra el alargamiento horizontal se muestra en la Figura 5.43, ambas curvas muestran la capacidad de carga del sistema de anillos sin revestimiento secundario. Además, las curvas de capacidad en la clave y la cubeta del túnel se muestran en la Figura

5.53, donde se observa que el desplazamiento en la clave y en la cubeta es prácticamente el mismo, puesto que en ambos puntos se tienen espesores de concreto y cuantías de acero iguales. La diferencia existente se atribuye a que no es simétrica la posición de las juntas longitudinales respecto a los puntos analizados. Como se observa en las curvas de las figuras 5.51 a 5.53, la capacidad estructural del anillo central con la aportación de los anillos contiguos es casi del 200% respecto a la del anillo aislado aún con revestimiento secundario. Primero comienzan a articularse las juntas y, posteriormente, estas se apoyan en las dovelas de los anillos contiguos, manteniendo estables esos puntos en el anillo.

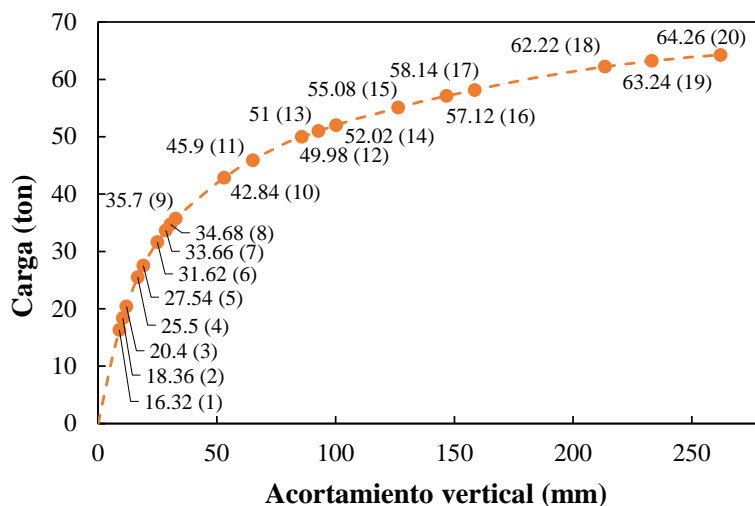


Figura 5.51. Curva de capacidad de los tres anillos sin revestimiento secundario en el sentido vertical.

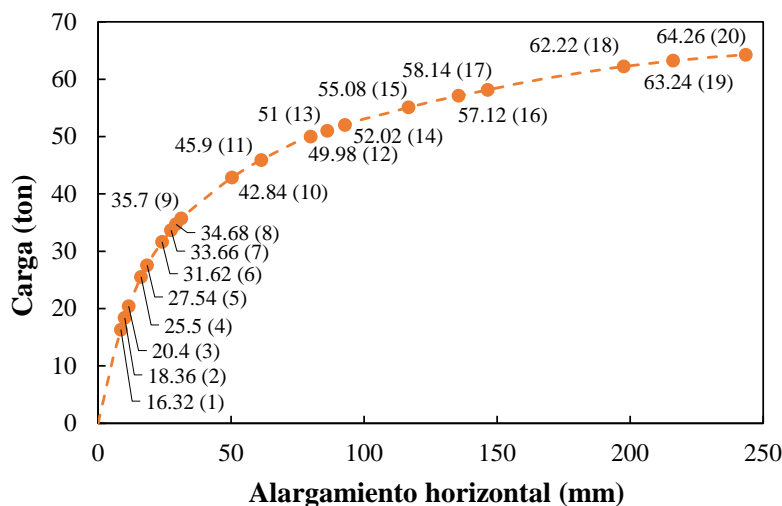


Figura 5.52. Curva de capacidad de los tres anillos sin revestimiento secundario en el sentido horizontal.

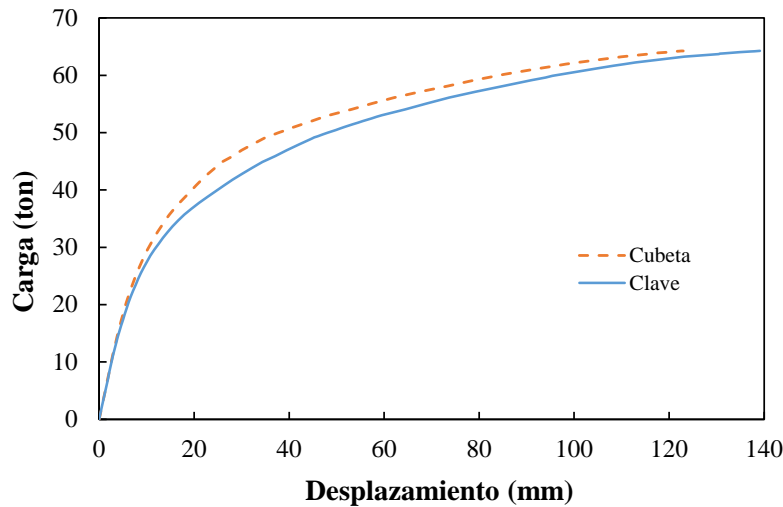


Figura 5.53. Curva de capacidad de los tres anillos sin revestimiento en clave y cubeta.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.54, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-1 y J-6 del anillo central a una carga de 16.32 t;
- 2.- Se articula la junta J-5 del anillo central a una carga de 18.36 t;
- 3.- Se articula la junta J-3 del anillo central a una carga de 20.40 t;
- 4.- Se articula la junta J-2 y J-8 del anillo superior e inferior a una carga de 25.50 t;
- 5.- Se articula la junta J-4 de los tres anillos a una carga de 27.54 t;
- 6.- Se articula la junta J-6 del anillo superior e inferior a una carga de 31.62 t;
- 7.- Se articula la junta J-2 y J-7 del anillo central a una carga de 33.66 t;
- 8.- Se articula la junta J-5 del anillo superior e inferior a una carga de 34.68 t;
- 9.- Se articula la junta J-8 del anillo central a una carga de 35.70 t;
- 10.- Se articula parte de la dovela D-3 del anillo central a una carga de 42.84 t;
- 11.- Se articula parte de la dovela D-3 y D-5 del anillo central a una carga de 45.90 t;
- 12.- Se articula parte de la dovela D-5 del anillo central a una carga de 49.98 t;
- 13.- Se articula parte de la dovela D-5 del anillo central a una carga de 51.00 t;
- 14.- Se articula parte de la dovela D-6 del anillo central a una carga de 52.02 t;
15. Se articula parte de la dovela D-3 del anillo central a una carga de 55.08 t;

16.- Se articula la junta J-7 y parte de la dovela D-4 del anillo superior e inferior a una carga de 57.12 t;

17.- Se articula parte de la dovela D-6 del anillo central a una carga de 58.14 t;

18.- Se articula parte de la dovela D-4 del anillo superior e inferior, además se articula parte de las dovelas D-1 y D-3 del anillo central a una carga de 62.22 t;

19.- Se articula parte de la dovela D-4 del anillo superior e inferior, además se articula parte de las dovelas D-1 y D-7 del anillo central a una carga de 63.24 t;

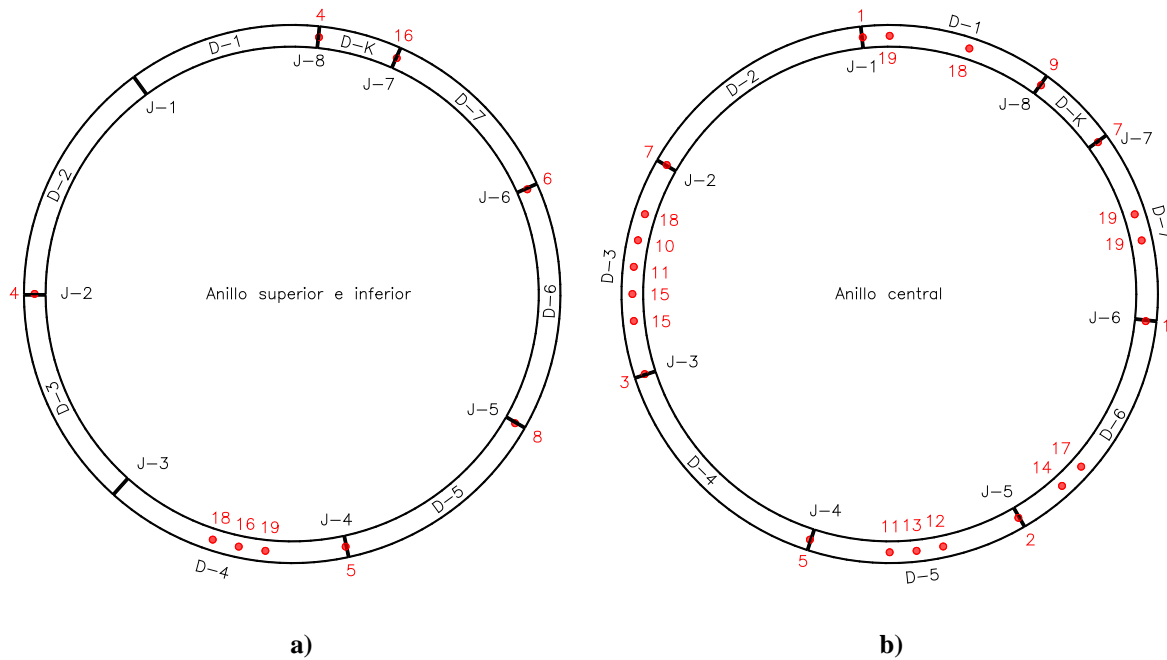


Figura 5.54. Mecanismo de colapso del sistema de tres anillos sin revestimiento secundario: a) anillo superior e inferior y b) anillo central

Los elementos mecánicos desarrollados en el anillo en el último paso de carga se muestran en las figuras 5.55 y 5.56. Como se observa en la Figura 5.55, los momentos máximos registrados en las dovelas ocurren en la posición de las juntas longitudinales del anillo contiguo, indicando que la interacción entre anillos asegura el aprovechamiento de la capacidad de las dovelas, ya que al alcanzar las juntas longitudinales su capacidad máxima de rotación, pueden apoyarse en las dovelas de los anillos contiguos, permitiendo al anillo resistir cargas mayores.

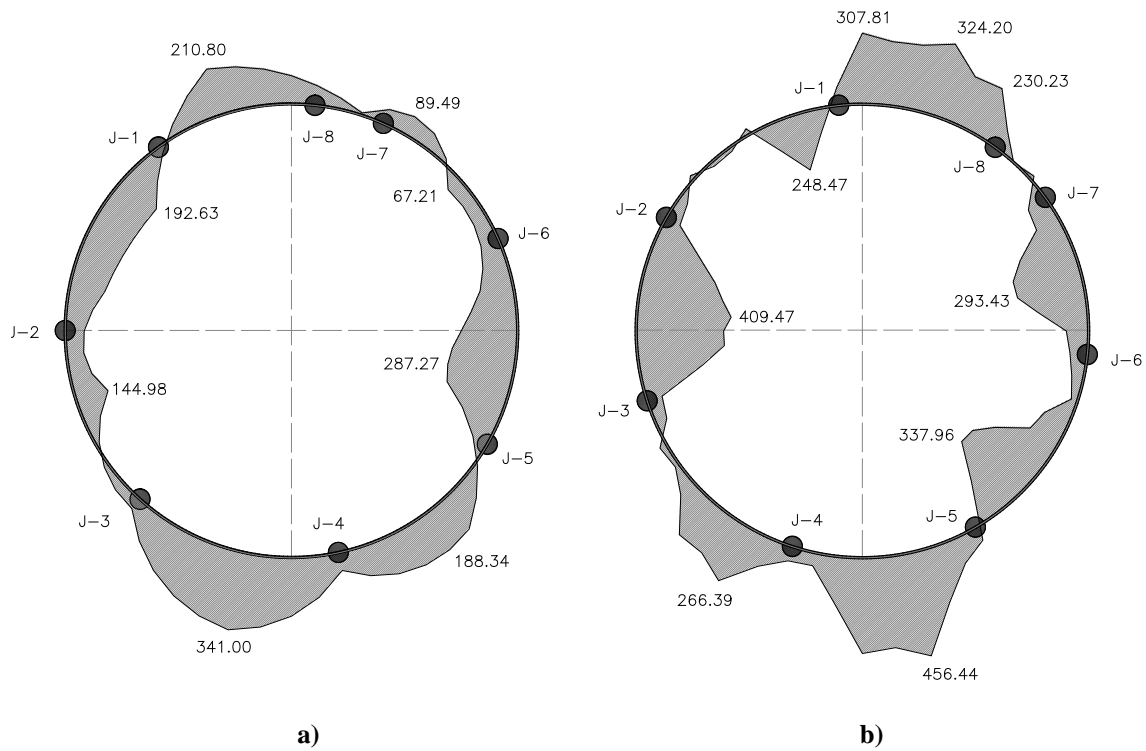


Figura 5.55. Momentos en anillos sin revestimiento secundario: a) anillo superior e inferior y b) anillo central

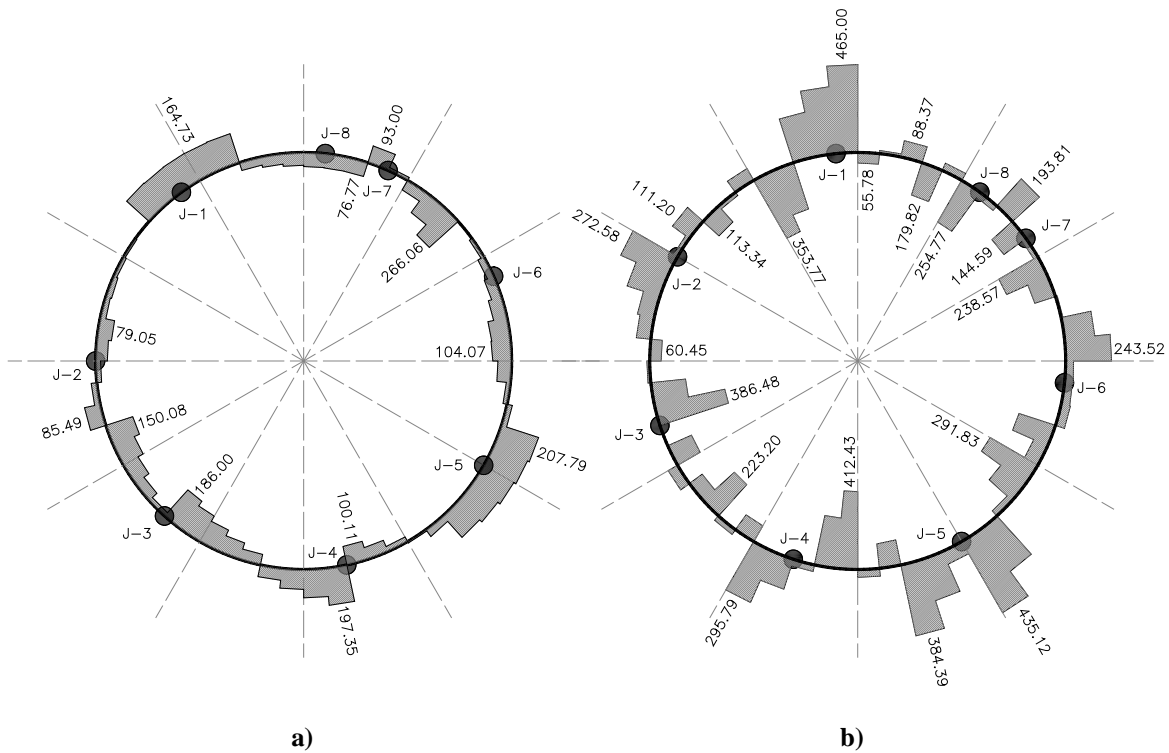


Figura 5.56. Cortantes en anillos sin revestimiento secundario: a) anillo superior e inferior y b) anillo central

5.3.4 Modelo de anillos con revestimiento secundario

5.3.4.1 Discretización

La discretización se realizó de la misma manera que en el anillo aislado con revestimiento secundario (sección 5.3.2.1), sólo que se colocaron los tres anillos paralelos en el mismo modelo, teniendo un total de 720 nodos. Cada uno de los tres anillos con revestimiento secundario está discretizado como se describe en la sección 5.3.2.1. En este modelo se agregaron elementos cuya función es generar tres tipos de interacciones: interacción entre anillos contiguos ($K_{a,y}$), interacción entre anillos y revestimiento secundario (K_{rix} , K_{riy}), y la unión del revestimiento secundario de un anillo con el del anillo contiguo ($K_{irx,y}$). Para generar los tres tipos de interacción se utilizaron resortes de rigidez traslacional (COMBIN14), cuyas leyes constitutivas se describen en la sección 5.3.4.2.

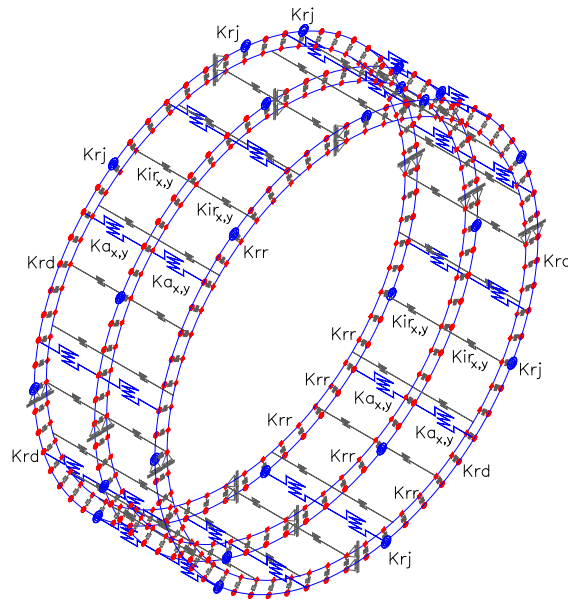


Figura 5.57. Discretización de anillos con revestimiento secundario.

5.3.4.2 Leyes constitutivas

La ley constitutiva momento-rotación asignada a las dovelas es la misma que se presentó en la sección 5.3.1.2, al igual que la ley constitutiva momento-rotación asignada a las juntas longitudinales.

En el caso de los resortes traslacionales que generan la interacción entre anillos por acoplamiento mecánico ($K_{a,y}$), se les asignó la ley constitutiva mostrada en la sección 5.3.3.2, cuya rigidez asegura una transmisión íntegra de las fuerzas cortantes de un anillo a

otro. Estos elementos se colocaron sólo en algunos puntos del anillo, tal como se fabricaría el sistema de machihembrado en la práctica.

Los resortes de rigidez traslacional que generan la interacción entre el anillo de dovelas y el revestimiento secundario (Krix, Kriy) se colocaron en todos los nodos de la periferia del túnel, generando una unión “perfecta” entre ambos revestimientos. No obstante, es importante mencionar que en la práctica, puede presentarse el deslizamiento o la desunión de ambos revestimientos en algunos puntos, y este modelo no es capaz de capturar ese fenómeno. La ley constitutiva carga – desplazamiento es la mostrada en la sección 5.3.2.2.

En la práctica, el revestimiento secundario se cuela monolíticamente, de tal manera que se tendrían tres anillos de dovelas con un anillo continuo (en periferia y en longitud) de concreto armado circunscrito en éste. No obstante, lo que se pretende al modelar el revestimiento secundario como tres anillos (continuo en la periferia pero no en la longitud), es capturar el fenómeno de desgarre que puede generarse en el revestimiento secundario en el caso de que existieran desplazamientos diferenciales considerables entre los anillos de dovelas. En este caso, debe asignarse a los resortes de rigidez traslacional ($K_{rx,y}$) un modelo constitutivo de resistencia a cortante calculado para las áreas de concreto y cuantías de acero correspondientes al revestimiento secundario, de tal manera que éste se desgarre en caso de superarse dicha resistencia. Sin embargo, en el modelo que se presenta en esta sección, se asignó una ley constitutiva carga – desplazamiento como la que se muestra en la Figura 5.58, considerando que el revestimiento está diseñado para soportar la transmisión de cargas sin desgarrarse.

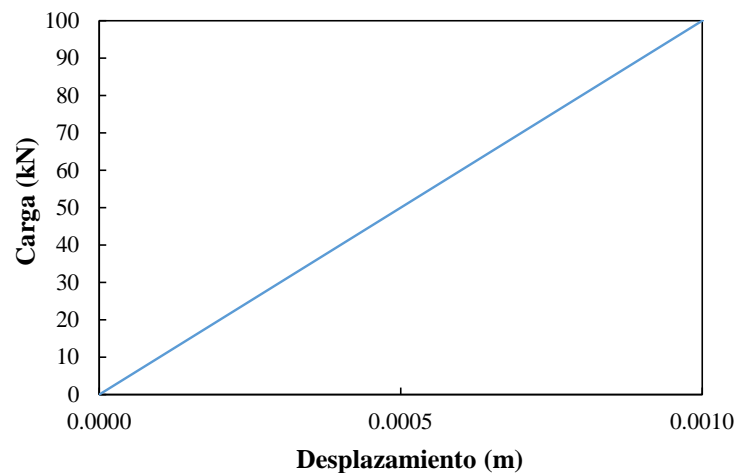


Figura 5.58. Ley constitutiva carga – desplazamiento para la unión del revestimiento secundario.

5.3.4.3 Cargas

Se aplicó una carga de ovalización con una relación $P_h/P_v=0.4$. Dicha carga se compone de una carga uniforme, la cual se aplicó primero y, posteriormente, se aplicó incrementalmente la carga de ovalización hasta ocurrir la falla en el modelo numérico. Los puntos de aplicación de las cargas así como sus magnitudes se muestran en la Figura 5.59. Es importante mencionar que las cargas mostradas sólo se aplicaron al anillo central, y no a los anillos contiguos.

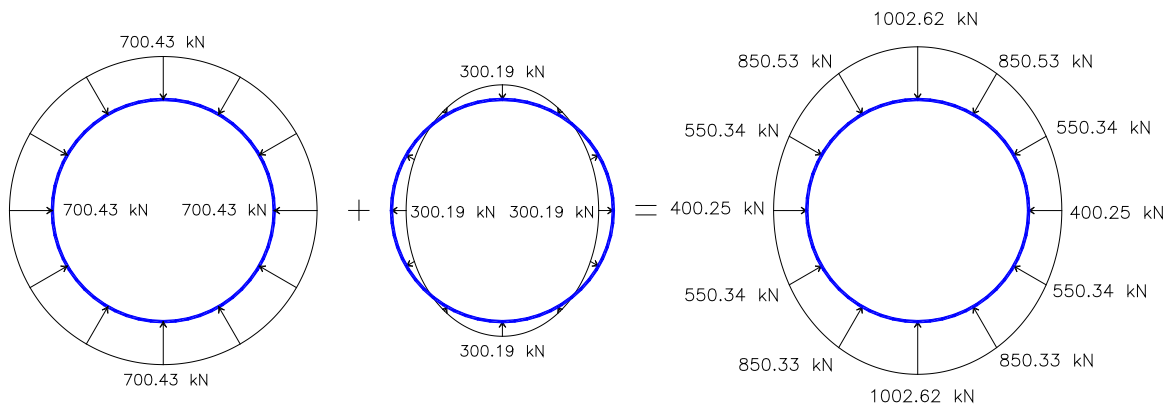


Figura 5.59. Cargas aplicadas al modelo numérico de anillos con revestimiento secundario.

5.3.4.4 Resultados

La curva de la carga contra el acortamiento vertical se muestra en la Figura 5.60, y la curva de la carga contra el alargamiento horizontal se muestra en la Figura 5.61, ambas curvas muestran la capacidad de carga del sistema de anillos con revestimiento secundario. Además, las curvas de capacidad en la clave y la cubeta del túnel se muestran en la Figura 5.62, donde se observa que la presencia del revestimiento secundario con un mayor espesor en la cubeta incrementa considerablemente la rigidez del anillo en ese punto. No obstante, las fuerzas por cortante se incrementan, por lo que debe realizarse un detallado adecuado para el cortante en estas zonas del túnel. Como se observa en las curvas de las figuras 5.60 a 5.62, la rigidez elástica del anillo central con la aportación de los anillos contiguos y del revestimiento secundario es de aproximadamente 225% la del sistema de tres anillos sin revestimiento secundario. Primero comienzan a articularse las juntas, y posteriormente estas se apoyan simultáneamente en las dovelas de los anillos contiguos y en el revestimiento secundario, manteniendo estables esos puntos en el anillo.

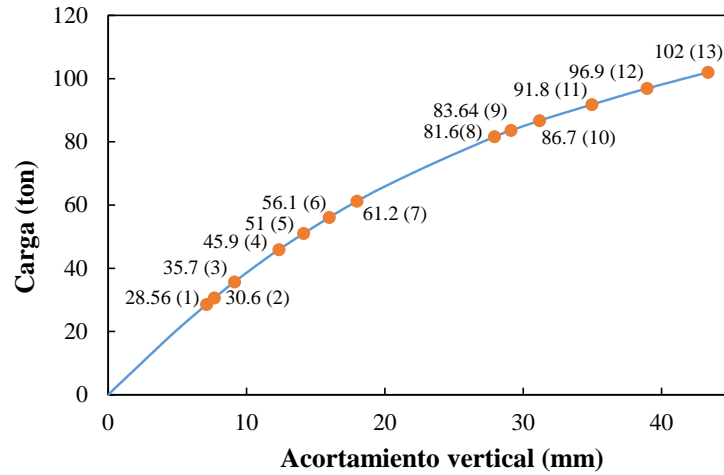


Figura 5.60. Curva de capacidad de los tres anillos con revestimiento secundario en el sentido vertical.

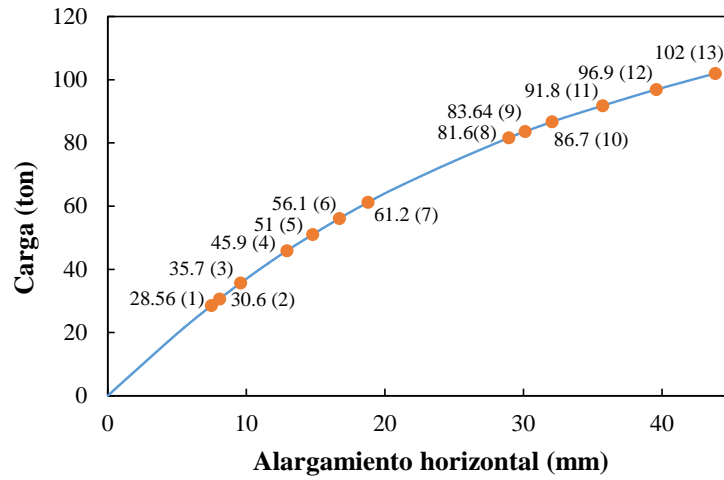


Figura 5.61. Curva de capacidad de los tres anillos con revestimiento secundario en el sentido horizontal.

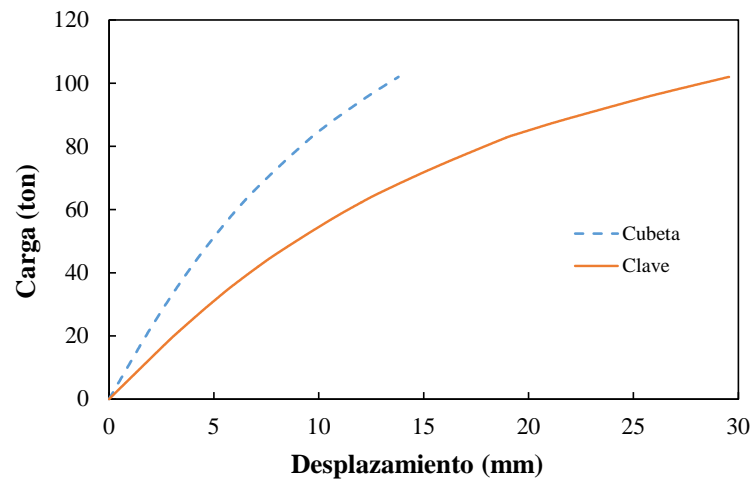


Figura 5.62. Curva de capacidad de los tres anillos con revestimiento en clave y cubeta.

El mecanismo de colapso del modelo numérico, mostrado en la Figura 5.63, es el siguiente:

- 1.- Se articula la junta J-5 del anillo central a una carga de 28.56 t;
- 2.- Se articula la junta J-1 del anillo central a una carga de 30.60 t;
- 3.- Se articula la junta J-6 del anillo central a una carga de 35.70 t;
- 4.- Se articula la junta J-3 del anillo central y la junta J-8 del anillo superior e inferior a una carga de 45.90 t;
- 5.- Se articula la junta J-2 del anillo superior e inferior a una carga de 51.00 t;
- 6.- Se articula la junta J-7 del anillo central y la junta J-3 del anillo superior e inferior a una carga de 56.10 t;
- 7.- Se articula la junta J-7 del anillo superior e inferior a una carga de 61.20 t;
- 8.- Se articula la junta J-8 del anillo central a una carga de 81.60 t;
- 9.- Se articula parte de la dovela D-1 y D-4 del anillo central a una carga de 83.64 t;
- 10.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm a la altura de la junta J-2 del anillo superior e inferior a una carga de 86.70 t;
- 11.- Se articula la junta J-2 y parte de la dovela D-3 del anillo central a una carga de 91.80 t;
- 12.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm a la altura de la junta J-6 del anillo superior e inferior, además se articula parte de la dovela D-3 y D-7 del anillo central a una carga de 96.90 t;
- 13.- Se articula el revestimiento secundario de 20 cm a la altura de la junta J-2 y el revestimiento secundario perteneciente a la cubeta a la altura de la junta J-4 del anillo superior e inferior, además se articula el revestimiento secundario a la altura de la junta J-6 y a la mitad de la dovela D-3 del anillo central a una carga de 102.00 t.

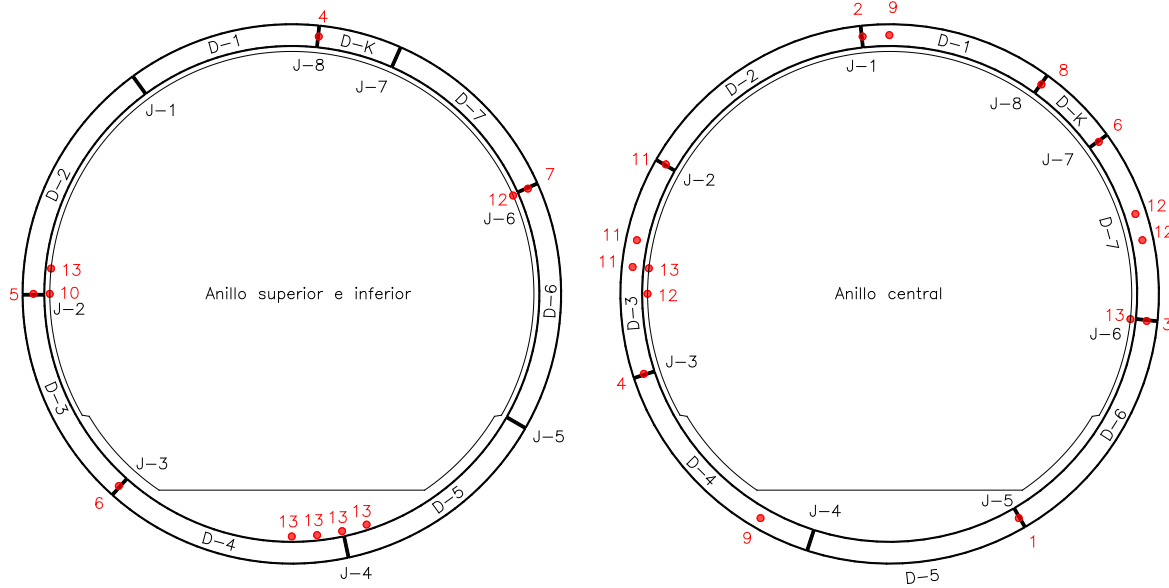


Figura 5.63. Mecanismo de colapso del sistema de tres anillos con revestimiento secundario.

Los elementos mecánicos desarrollados en el anillo en el último paso de carga se muestran en las figuras 5.64 a 5.67. Como se observa en la Figura 5.65, cuando las juntas longitudinales alcanzan su máxima capacidad, es el revestimiento secundario quien toma las flexiones. No obstante, entre las juntas, son las dovelas quienes toman la mayor parte de las fuerzas y no el revestimiento secundario, lo cual se debe a que las dovelas tienen una mayor rigidez, y toman entonces la mayor parte de las cargas. Sin embargo, en la zona de la cubeta, es el revestimiento quien toma la mayor parte de las fuerzas, y no las dovelas. Esto se atribuye claramente a la mayor rigidez de esta zona del revestimiento respecto a la de las dovelas. Además, en la Figura 5.67 se observa que existe una concentración de fuerzas cortantes en la zona de transición de espesores del revestimiento secundario.

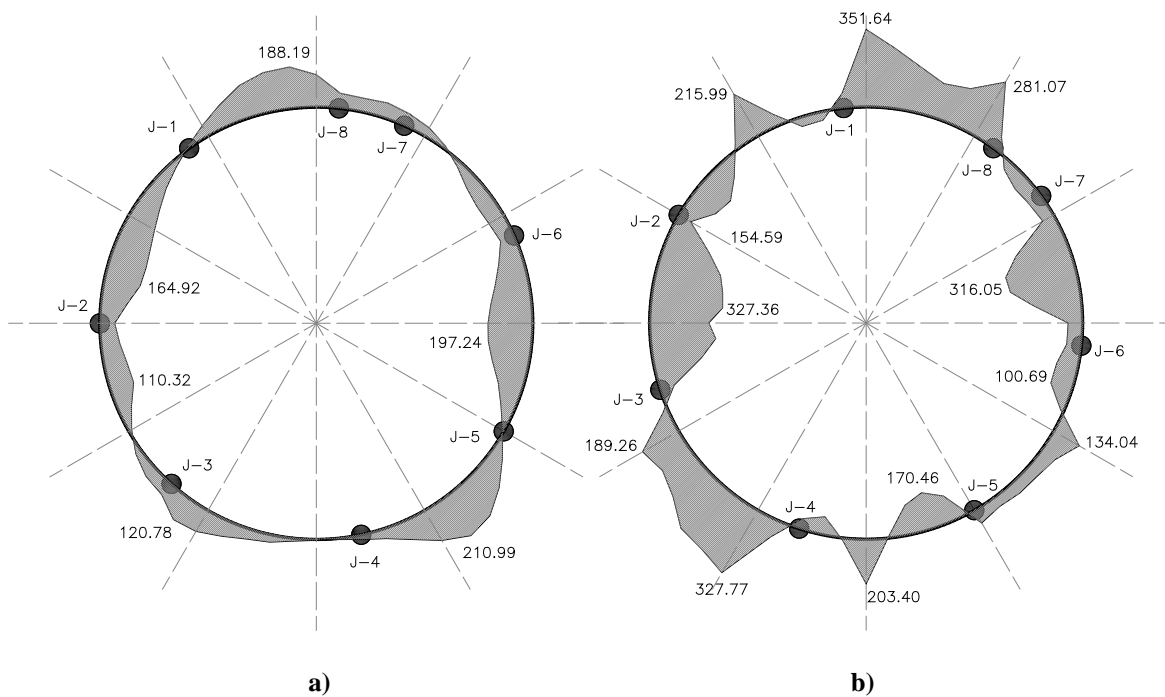


Figura 5.64. Momentos en anillos con revestimiento secundario a) anillo superior e inferior y b) anillo central

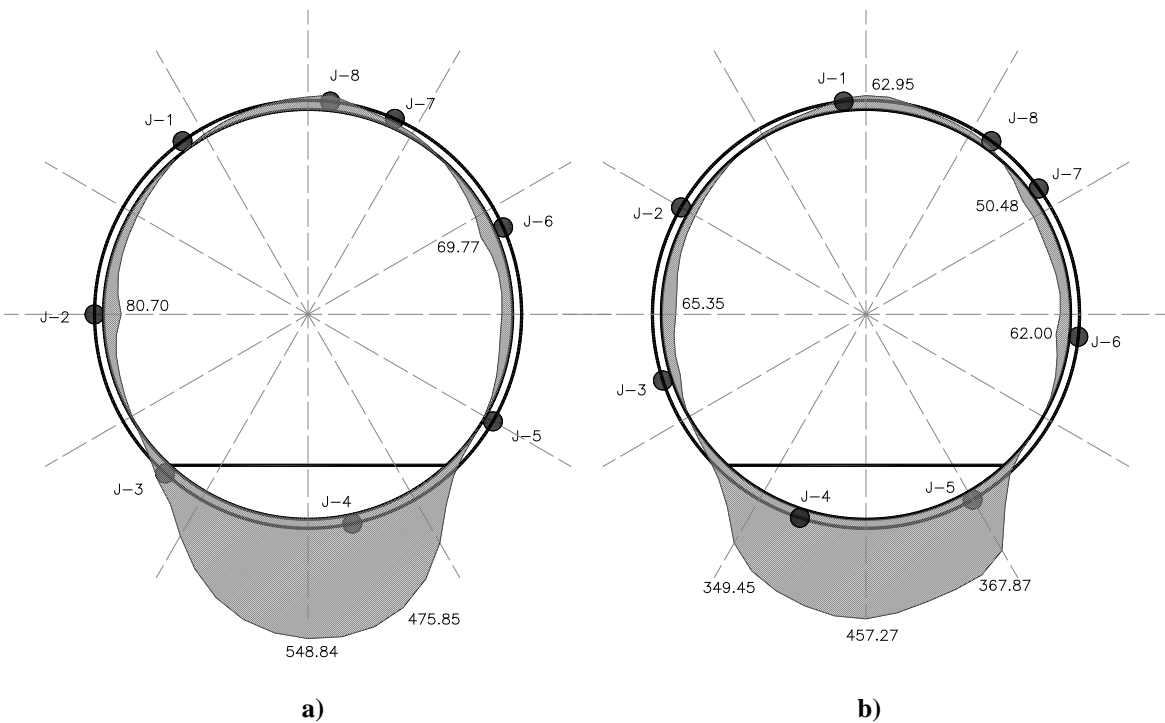


Figura 5.65. Momentos en anillos con revestimiento secundario a) revestimiento superior e inferior y b) revestimiento central

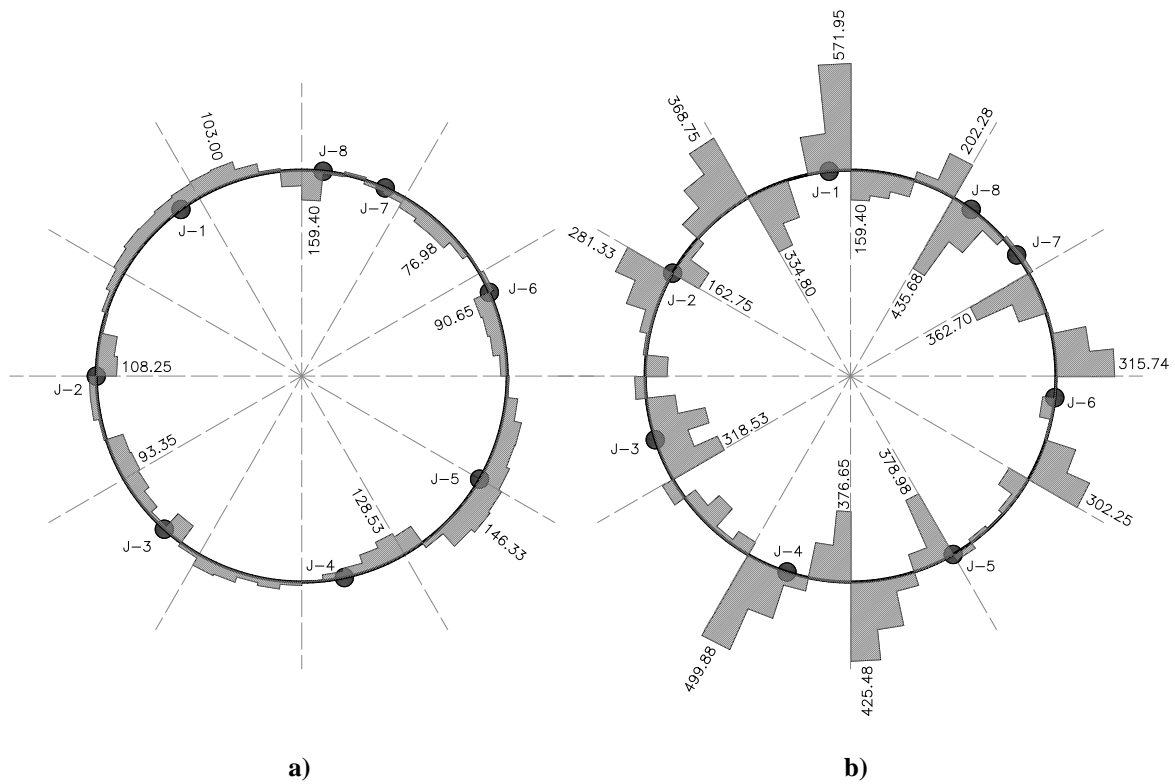


Figura 5.66. Cortantes en anillos con revestimiento secundario a) anillo superior e inferior y b) anillo central

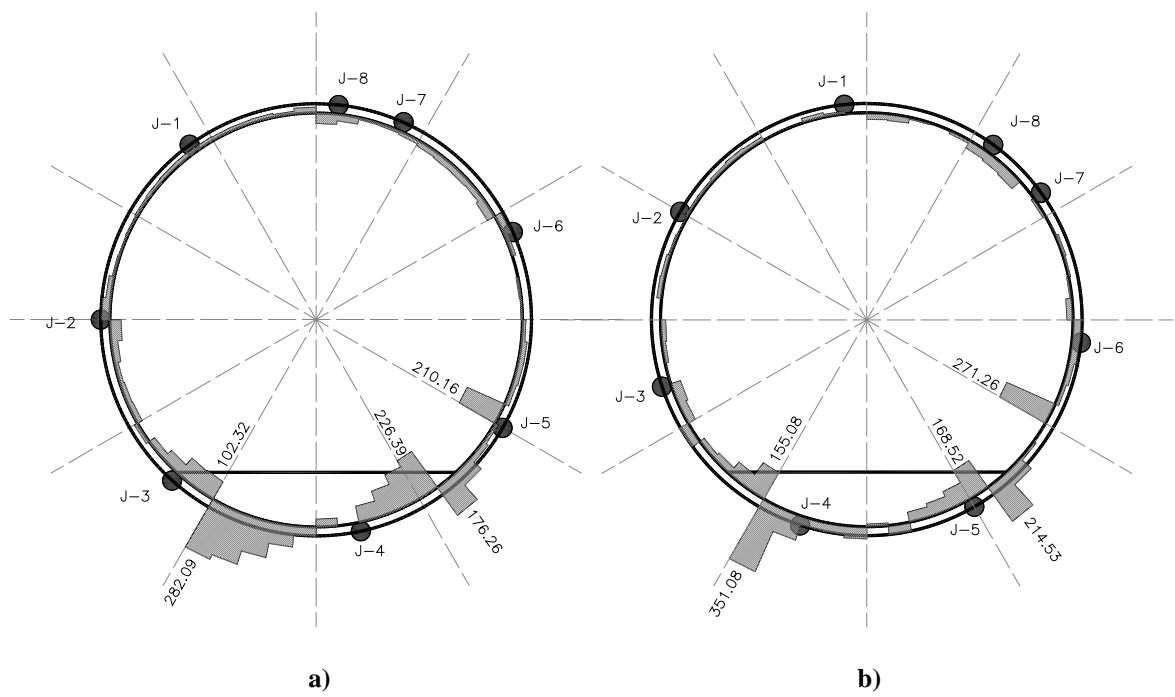


Figura 5.67. Cortantes en anillos con revestimiento secundario a) revestimiento superior e inferior y b) revestimiento central

5.3.5 Comparación de la capacidad de los modelos

En las figuras 5.68 y 5.69 se observan las curvas de capacidad de los cuatro modelos descritos en las secciones anteriores. De estas figuras se concluye lo siguiente:

- 1.- El único modelo que soportó la carga aplicada de 102.00 kN fue el cuarto modelo (sistema de tres anillos con revestimiento secundario), pues el resto de los modelos alcanzó una carga menor.
- 2.- El anillo que trabaja aisladamente, sin revestimiento secundario y sin el soporte que proporciona el suelo, tiene menor capacidad de carga comparado con los otros tres modelos.
- 3.- La presencia del revestimiento secundario, tanto en el modelo del anillo aislado como en el de sistema de tres anillos, aumenta considerablemente la rigidez y capacidad de carga del túnel.
- 4.- Aún sin la presencia del revestimiento secundario, el tercer modelo (sistema de tres anillos sin revestimiento secundario) muestra una mayor capacidad que el segundo modelo, que si tiene revestimiento secundario. Lo anterior indica que la interacción entre anillos tiene una mayor influencia en la rigidez y capacidad de carga del sistema que la presencia del revestimiento secundario.
- 5.- Del punto anterior, se concluye que es importante asegurar la interacción entre anillos. Dado que no se sabe con exactitud el remanente de carga axial producto del empuje de la TBM en el proceso constructivo que propicia la interacción entre anillos por fricción, debe asegurarse dicha interacción mediante acoplamiento mecánico, diseñando un sistema de machihembrado que asegure la transmisión de fuerzas cortantes de un anillo a otro.

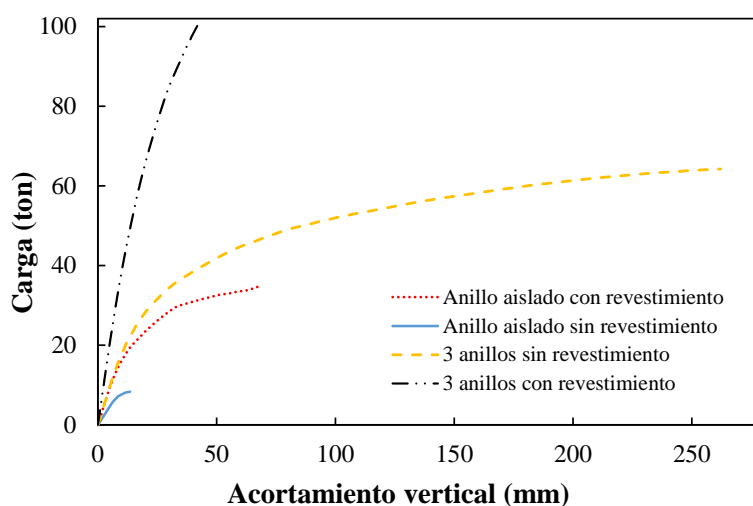


Figura 5.68. Comparación de las curvas de capacidad de los modelos en el sentido vertical.

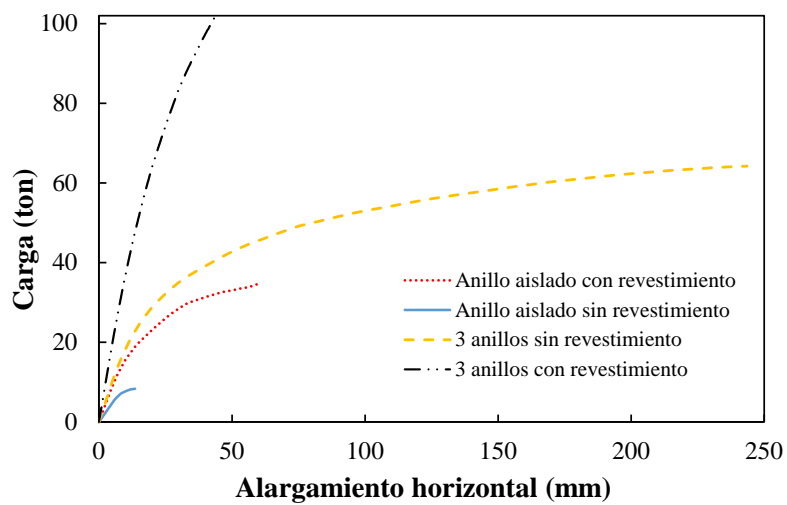


Figura 5.69. Comparación de las curvas de capacidad de los modelos en el sentido horizontal.

5.4 Túnel ICA

En el caso de la prueba experimental realizada por ICA, se analizó el modelo numérico de los tres anillos trabajando en conjunto considerando las cargas descritas en la sección 3.2.2 hasta la etapa 4 (sólo los anillos formados por dovelas); posteriormente se analizaron en conjunto considerando las cargas desde la etapa 5 hasta la etapa 9 (anillos de dovelas y revestimiento secundario). Es importante mencionar que los resultados que se mostrarán en la sección 5.4.1.4, difieren de los resultados reportados por [12]; estas diferencias se atribuyen a las razones siguientes:

- 1.- La incertidumbre de las cuantías de acero utilizadas para los constitutivos a flexión de las dovelas.
- 2.- La incertidumbre de las magnitudes, relaciones Ph/Pv y puntos de aplicación de las cargas reportadas en [12].
- 3.- No se proporcionan las posiciones de las juntas longitudinales de los medios anillos.

Aún y con las diferencias que se observan entre los resultados experimentales y el modelo numérico que se describe en la sección 5.4.1, la intención de reportar este último es mostrar la capacidad del programa ANSYS en este tipo de análisis, utilizando las herramientas descritas en los apartados siguientes, y seguramente se obtendrían mejores resultados de tener certeza de los valores mencionados anteriormente.

5.4.1 Modelado considerando anillos y revestimiento secundario

5.4.1.1 Discretización

La discretización de este modelo es idéntica a la descrita en la sección 5.3.4.1, puesto que dicho modelo se realizó con las mismas dimensiones que el modelo experimental del túnel ensayado por ICA. No obstante, los elementos resortes traslacionales que modelan la interacción del revestimiento secundario con las dovelas se mantienen desactivados en el modelo hasta el término de la etapa 4 (etapa en el experimento en que se construye el revestimiento secundario), y posteriormente estos se activan, de tal manera que a partir de ese momento se observa en el modelo el comportamiento del anillo trabajando en conjunto con el revestimiento secundario. Para modelar este efecto, se utilizaron los comandos EKILL y EALIVE, cuya función es la de mantener desactivados y activados, respectivamente, los elementos requeridos en determinadas etapas de carga del modelo.

5.4.1.2 Leyes constitutivas

Las leyes constitutivas utilizadas en este modelo son los descritos en la sección 5.3.4.2. No obstante, para los anillos superior e inferior se utilizó una ley constitutiva momento-rotación diferente, tanto en las dovelas, juntas longitudinales y revestimiento secundario, puesto que en el modelo experimental las dovelas de estos anillos tienen una sección igual a la mitad de la sección del anillo central. Dichas leyes constitutivas se muestran en las Figuras 5.70 a 5.73.

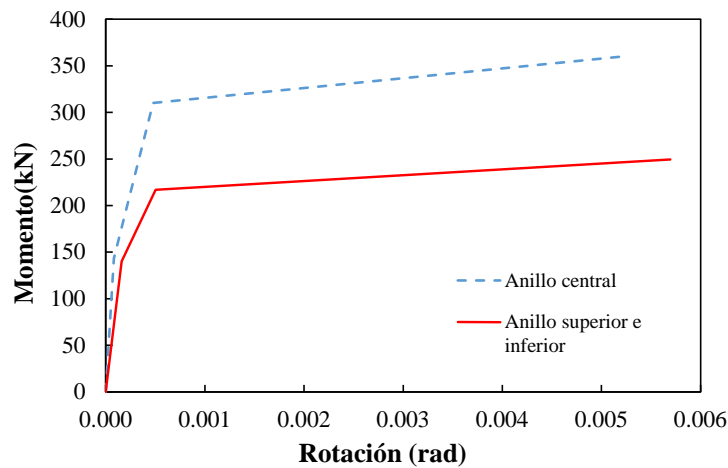


Figura 5.70. Leyes constitutivas momento-rotación de las dovelas del túnel ICA.

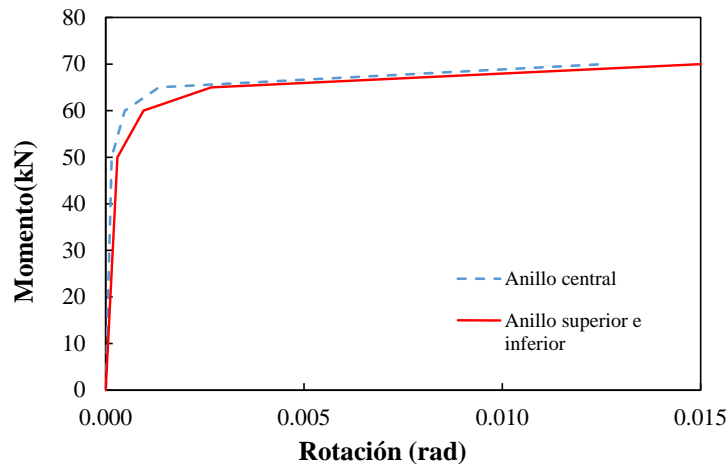


Figura 5.71. Leyes constitutivas momento-rotación de las juntas longitudinales del túnel ICA.

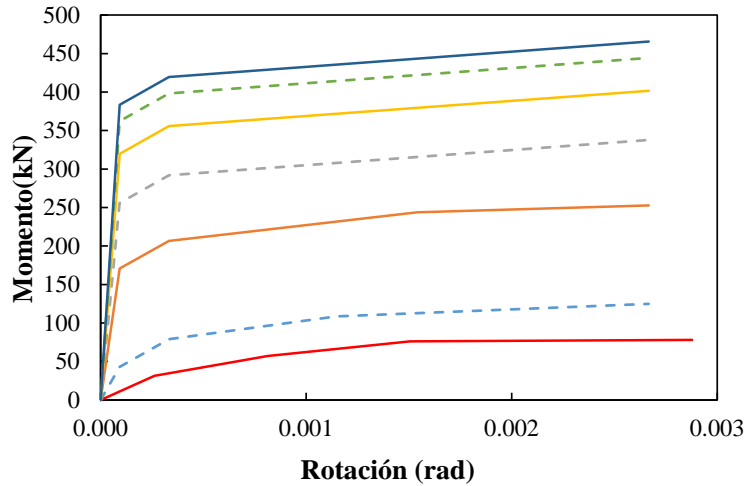


Figura 5.72. Leyes constitutivas del revestimiento secundario según su espesor para medios anillos del túnel ICA (flexión positiva).

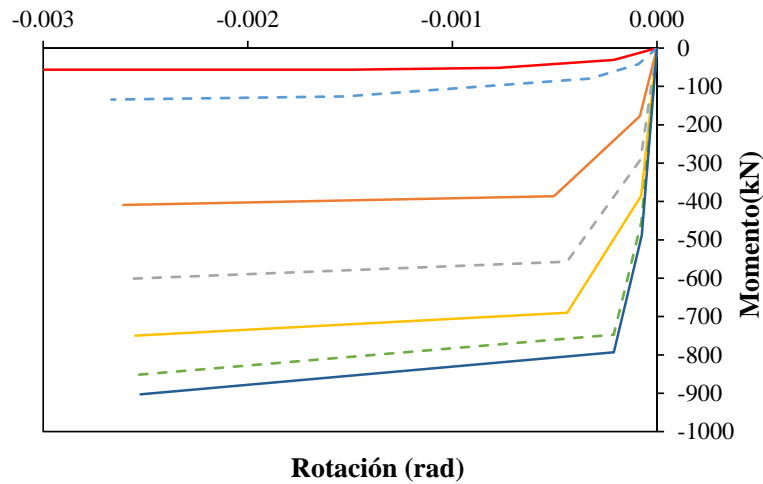


Figura 5.73. Leyes constitutivas del revestimiento secundario según su espesor para medios anillos del túnel ICA (flexión negativa).

5.4.1.3 Cargas

Las cargas que se aplicaron al modelo varían en magnitud y en relación Ph/Pv, como se describe en la sección 3.2.2. En la Figura 5.74, se muestra la configuración de cargas correspondiente a la etapa 9, cuya relación Ph/Pv = 0.40.

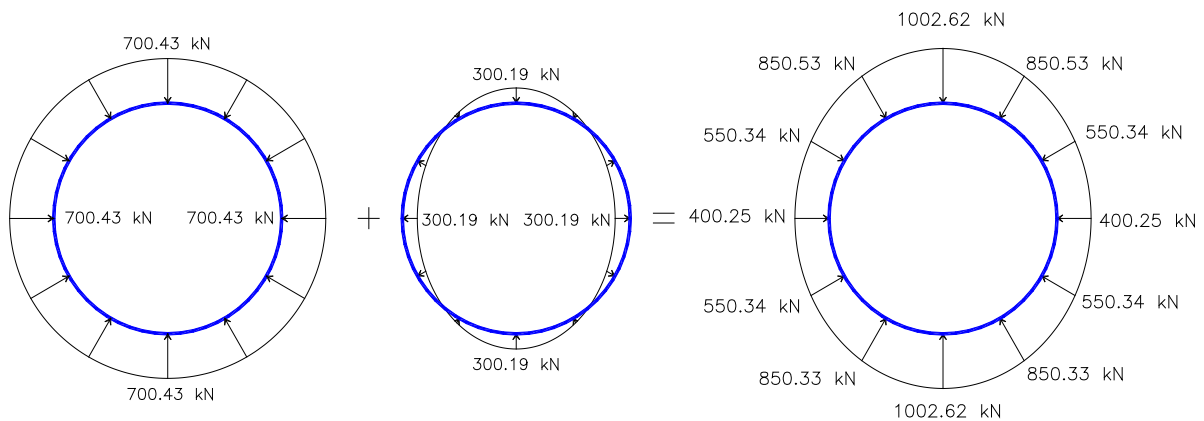


Figura 5.74. Configuración de cargas correspondiente a la etapa 9.

5.4.1.4 Resultados

La curva de la carga contra el acortamiento vertical se muestra en la Figura 5.75, de la cual se hace un acercamiento a las etapas de carga 4 a 6 para su mejor visualización en la Figura 5.76, y la curva de la carga contra el alargamiento horizontal se muestra en la Figura 5.77, de la cual se hace un acercamiento a las etapas de carga 4 a 6 para su mejor visualización en la Figura 5.78, ambas curvas muestran la capacidad de carga del sistema de anillos sin revestimiento (etapa 4 de carga y descarga) y con revestimiento secundario (etapas de carga 5 a 9). De las curvas se observa lo siguiente:

- 1.- Al comparar las etapas 4 y 5 de carga (únicas etapas directamente comparables para este efecto dado que tienen la misma relación $Ph/Pv = 0.83$), se observa el incremento de la rigidez del anillo debido a la presencia del revestimiento secundario. Además, no es posible comparar las descargas de estas etapas debido a que el programa ANSYS sólo permite descargar con la misma pendiente elástica en todos los casos, razón por la que las descargas de todas las etapas tienen la misma pendiente.
- 2.- Conforme la carga de ovalización es más crítica (cuando la relación Ph/Pv tiende a cero), la rigidez del anillo disminuye, a tal grado que en la última etapa de cargas, cuya relación Ph/Pv es 0.40, la rigidez del anillo se ha perdido casi por completo.
- 3.- El desplazamiento total, tanto vertical como horizontal, es de aproximadamente 70 mm, comparados con los 40 mm de la prueba experimental. La diferencia de ambos desplazamientos se atribuye a las razones planteadas en la sección 5.4 y, además, a que las ramas de descarga que calcula el programa ANSYS tienen la pendiente elástica, por lo que ocurren desplazamientos mayores en la descarga, a diferencia de los registrados en el experimento, los cuales en ocasiones son nulos u opuestos. En las etapas de carga correspondientes al anillo de dovelas sin revestimiento se observan rigideces similares. Sin embargo, en las etapas de carga correspondientes al anillo con revestimiento secundario se observan diferencias importantes en las rigideces. Esto se atribuye a que en el experimento la sección de la dovela con el revestimiento forma un solo elemento compuesto, el cual

incluye un solo comportamiento de ambos revestimientos; sin embargo, en el modelo numérico discretizado con elementos viga, no se incluye el comportamiento de un solo elemento compuesto, sino que se suman las características de inercia, lo que produce secciones con rigideces menores. En consecuencia, el modelo numérico presenta curvas menos rígidas que las reportadas experimentalmente, como se muestra en las figuras 5.79 y 5.80.

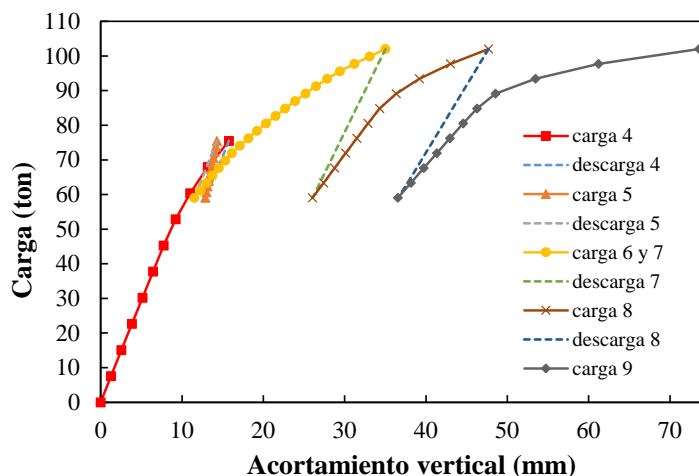


Figura 5.75. Curva carga-acortamiento vertical del túnel ICA.

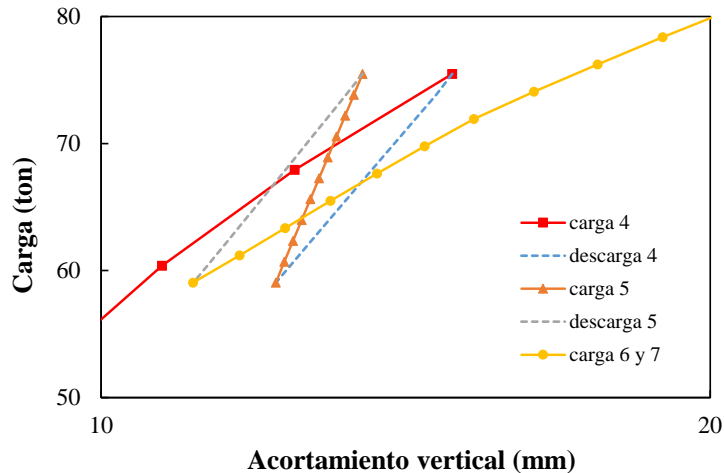


Figura 5.76. Curva carga-acortamiento vertical del túnel ICA (acercamiento de etapas 4 a 7)

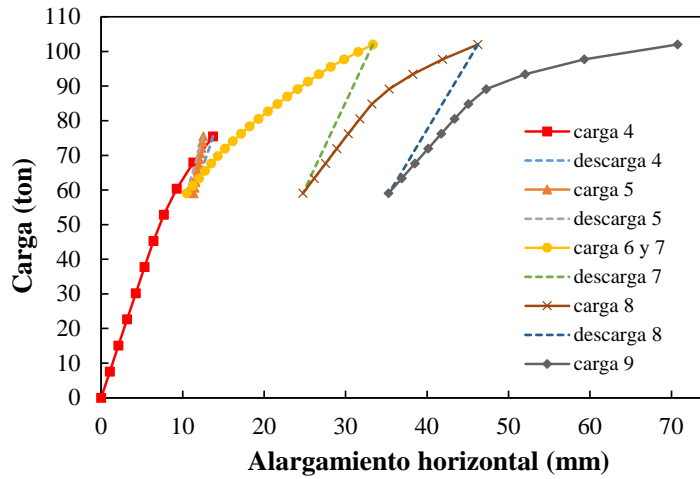


Figura 5.77. Curva carga-alargamiento horizontal del túnel ICA.

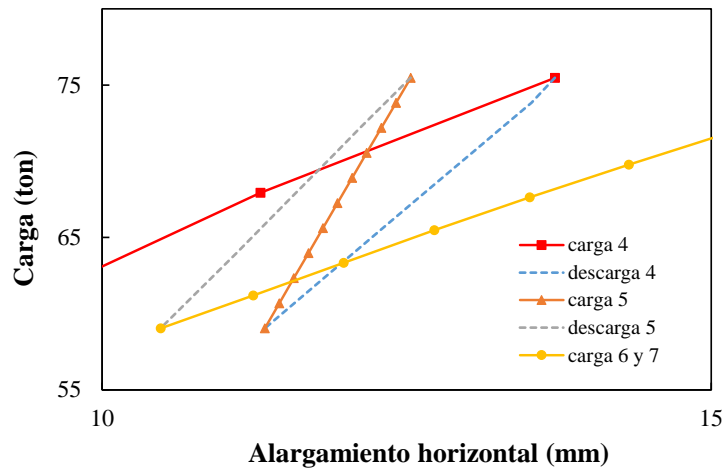


Figura 5.78. Curva carga-alargamiento horizontal del túnel ICA (acercamiento de etapas 4 a 7)

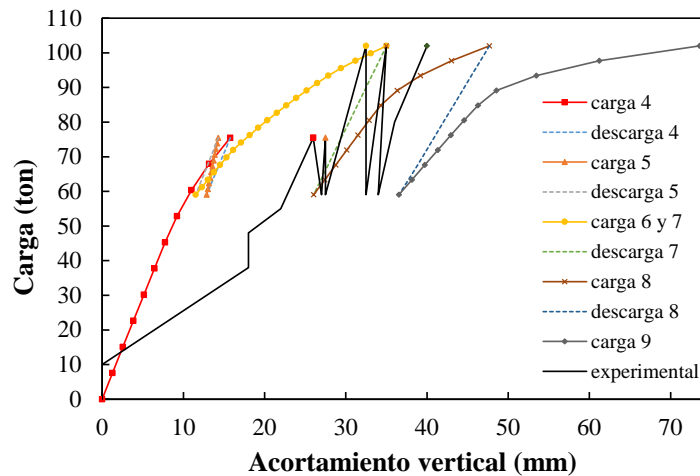


Figura 5.79. Comparación de curvas en acortamiento vertical del modelo experimental y numérico.

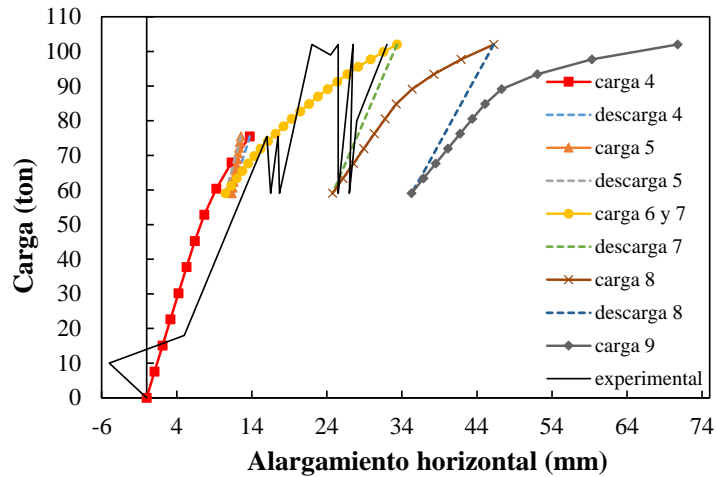


Figura 5.80. Comparación de curvas en alargamiento horizontal del modelo experimental y numérico.

5.5 Túnel con doble revestimiento de sección continua

El anillo utilizado para los modelos numéricos realizados en la presente sección tiene 9.91 m de diámetro exterior y 9.11 m de diámetro interior como se muestra en la Figura 5.82. Las dovelas, D-n, tienen una sección transversal de 40 cm de altura y 150 cm de longitud. El anillo está formado por 7 dovelas y una dovela llave, por lo que se tienen 8 juntas longitudinales, J-n. El revestimiento secundario tiene un espesor constante desde 30 cm. El acero de refuerzo de la sección transversal es el que se muestra en la Figura 5.81. El $f'c$ de ambos revestimientos es de 450 kg/cm^2 . Las dimensiones de las juntas longitudinales son 17 cm de ancho y 1.39 m de longitud.

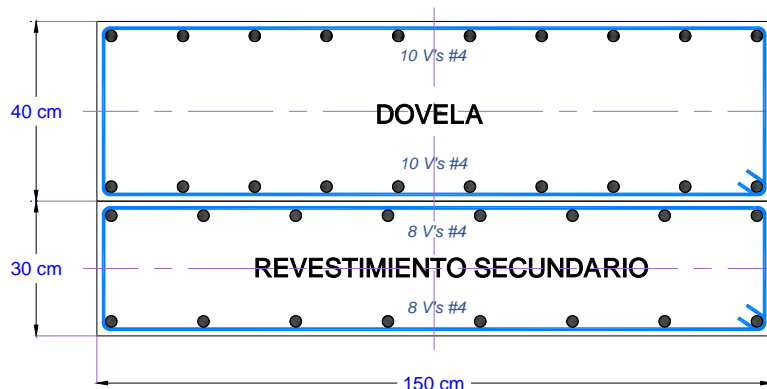


Figura 5.81. Sección transversal del túnel con doble revestimiento de sección continua.

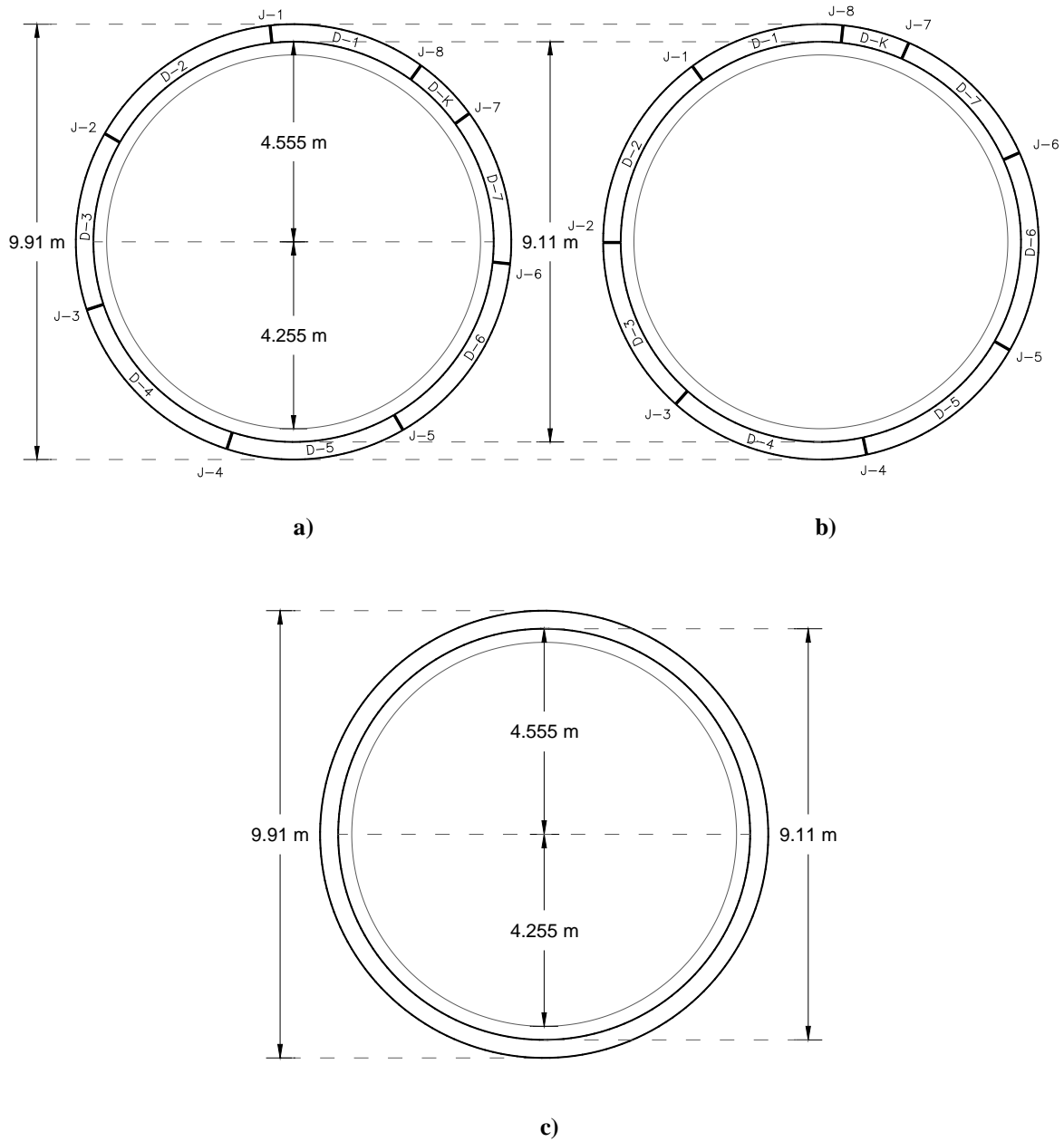


Figura 5.82. a) Anillo de doble revestimiento con juntas (posición fuerte) b) Anillo de doble revestimiento con juntas (posición débil) y c) Anillo de doble revestimiento continuo.

En los modelos analizados se utilizaron diferentes relaciones K_0 de las cargas de ovalización para determinar la influencia que tiene este parámetro en los mecanismos de colapso, por lo que se utilizaron los valores de K_0 siguientes: 0.93, 0.85, 0.80, 0.70 y 0.60. La distribución de las cargas se calculó utilizando la expresión (B.13), tal como se muestra en la Figura 5.83.

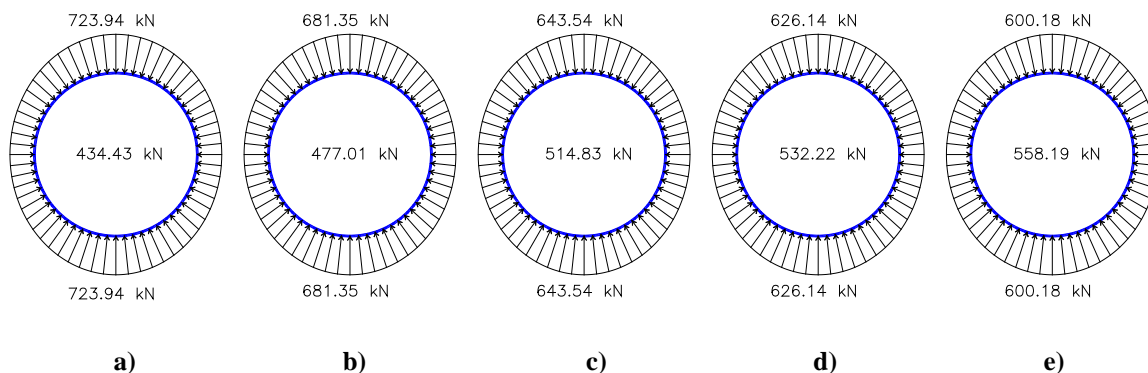


Figura 5.83. Relaciones de carga K_0 : a) 0.60, b) 0.70, c) 0.80, d) 0.85 y e) 0.93

En el análisis paramétrico que se presenta en este apartado, se tomaron algunas otras consideraciones de modelado, mismas que se enumeran y describen a continuación:

1.- Condiciones de frontera: a diferencia de los modelos anteriores en los que se colocó un apoyo de rodillo en los puntos cardinales de la sección del túnel, se colocaron resortes de rigidez elástica muy pequeña “Kra” (0.1 kN/m) en toda la periferia del túnel, como se muestra en la Figura 5.84. Cuando se llevan los modelos al colapso, modelar los apoyos de esta forma brinda mejores resultados, pues los apoyos tienen ninguna a poca influencia en el mecanismo de colapso y capacidad de carga del túnel.

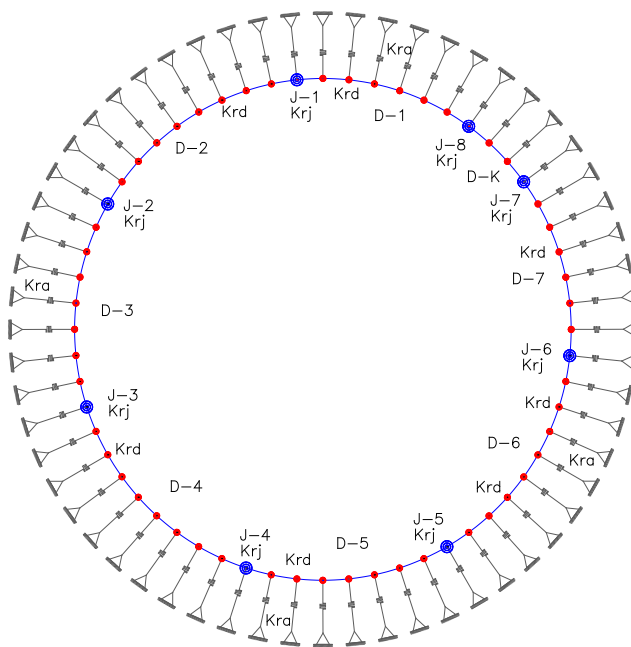


Figura 5.84. Resortes de apoyo en la periferia del modelo del túnel.

2.- Carga axial: En los modelos anteriores, se utilizó solo una carga axial promedio para calcular las leyes constitutivas momento – rotación de las juntas y las dovelas y se efectuó

un solo análisis. En los modelos presentados en esta sección, se comienza el primer análisis con una carga axial supuesta (que puede ser la promedio o la calculada con la fórmula (B.4), y posteriormente se itera entre análisis y análisis hasta que la carga axial producto de dicho análisis sea igual a la supuesta para calcular las leyes constitutivas (carga axial producto del análisis anterior). De esta manera, se asegura que la carga axial supuesta sea la máxima que se desarrolla en el modelo, y no hay un sub o sobre estimado de la misma.

3.- Cargas radiales: Las cargas radiales se aplicaron en toda la periferia del túnel, y no solo en algunos puntos (12 puntos en los modelos anteriores). Discretizar la carga en más puntos, se asemeja más a la condición real del túnel, en la que el suelo está en contacto con toda el área exterior de la dovela a través del grout de inyección.

Con las consideraciones de modelado mencionadas, se desarrollaron 15 modelos con los que se determinarán algunas características importantes en el modelado no lineal de túneles dovelados: ¿qué influencia tiene la posición de las juntas en la capacidad de carga del anillo?, ¿qué influencia tienen las juntas y su posición de los anillos contiguos?, ¿cuál es la diferencia de rigidez que existe entre considerar las juntas en el anillo o modelarlo como anillo continuo?, ¿cuál es la diferencia de rigidez entre modelar un anillo de doble revestimiento en el que el anillo primario se modela con juntas y otro en el que el anillo primario se modela continuo?.

En los modelos desarrollados, se etiqueta a uno de los anillos como “posición fuerte” y a otro como “posición débil”. Se aclara que dichas posiciones no son la configuración “más fuerte” o “más débil” posibles para el anillo analizado, sino que, de las dos, se identifica a una de ellas con más capacidad de carga que la otra.

5.5.1 Anillo aislado sin revestimiento (posición débil) $K=0.93$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82b. El propósito de este modelo es determinar la influencia que tiene la posición de las juntas en la capacidad de carga del anillo aislado. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83e. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue aproximadamente constante y de un valor de 2500 kN. En los hastiales, dicha carga fue 2.5% más grande que en la clave y cubeta, como se muestra en la Figura 5.85.

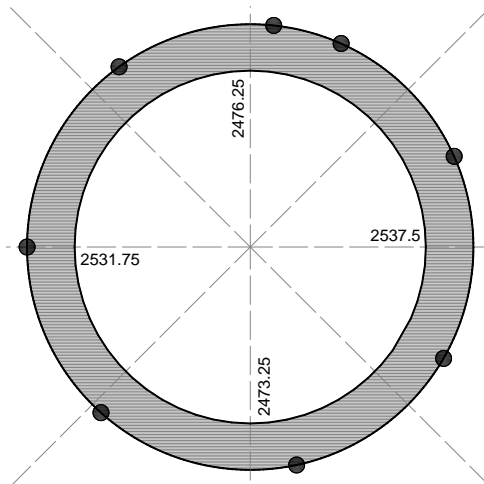


Figura 5.85. Carga axial en revestimiento primario de anillo aislado en posición débil

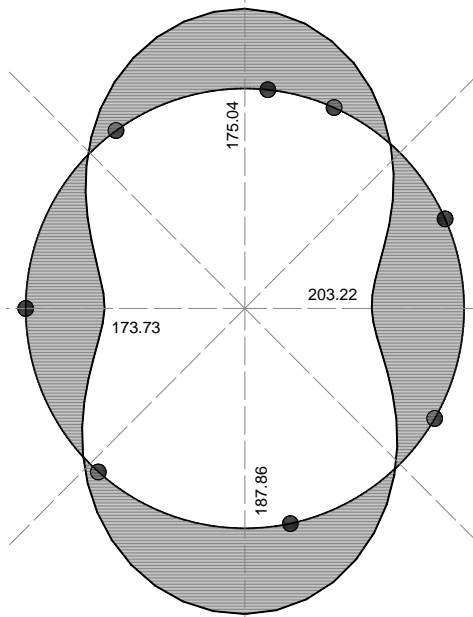


Figura 5.86. Momentos flexionantes en revestimiento primario de anillo aislado en posición débil

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.86. La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad de las juntas que, para este caso, es de aproximadamente 173 kNm (la capacidad de las 8 juntas varía ligeramente debido a que la carga axial que actúa en estas también varía según se observa en la Figura 5.85). De la magnitud de los momentos y la posición de las juntas, se observa que: en el hastial izquierdo está localizada la junta J-2, y el momento máximo desarrollado en ese punto es el momento plástico de la junta, 173.7 kN; el hastial derecho logró desarrollar más flexión dado que las dos juntas contiguas no están muy cercanas al punto, permitiendo que la

dovela contribuyera en más medida a la resistencia del anillo; la zona de la cubeta desarrolló un poco más de capacidad a flexión (187.86 kN) que la zona de la clave (175.04 kN), dado que ésta última tiene la junta más cerca al punto crítico.

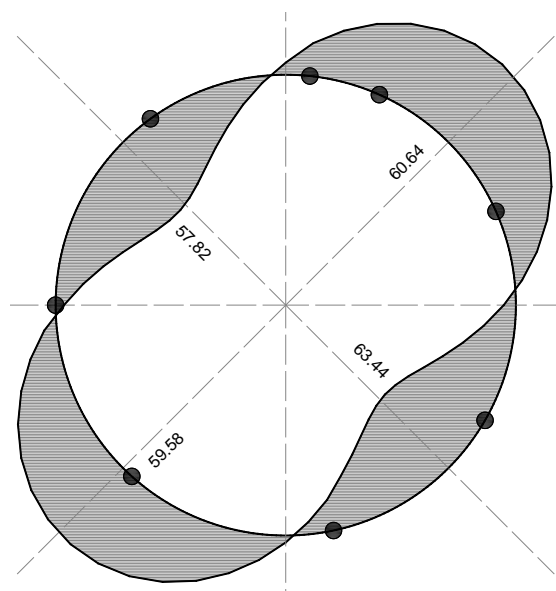


Figura 5.87. Cortantes en revestimiento primario anillo aislado en posición débil.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.87. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas.

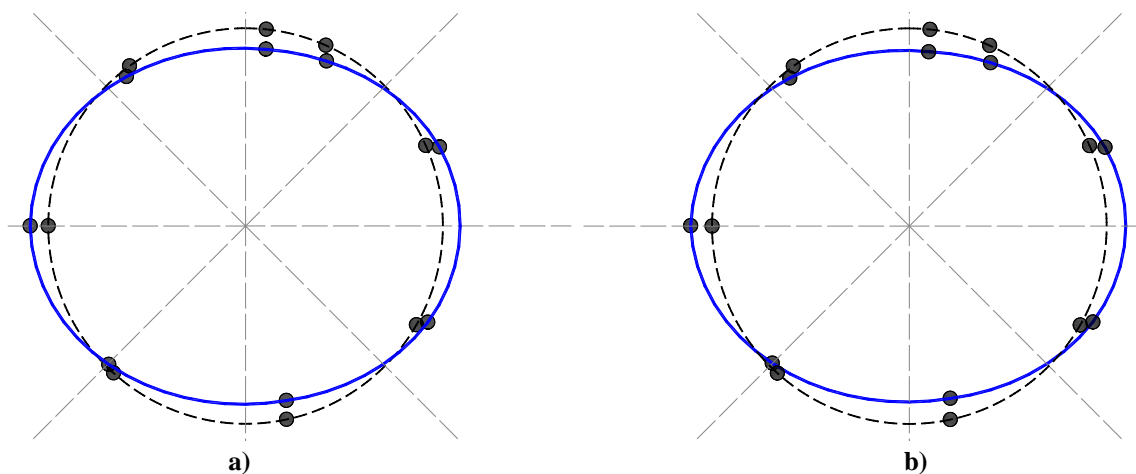


Figura 5.88. Deformadas de anillo aislado en posición débil cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.88a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.76%, y la Figura 5.88b corresponde a la deformada del

anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 0.86%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

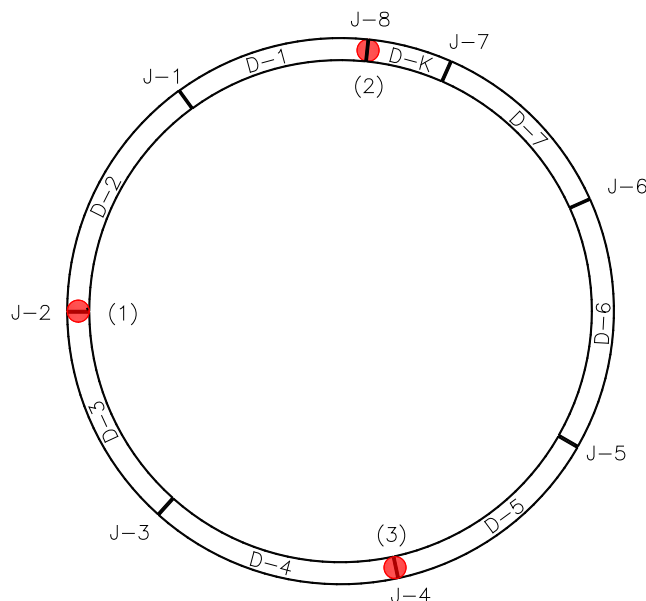


Figura 5.89. Mecanismo de colapso de anillo aislado en posición débil

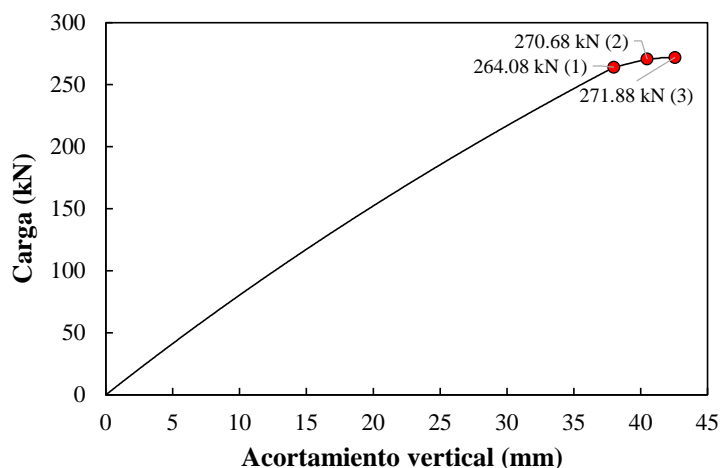


Figura 5.90. Curva de capacidad de anillo aislado en posición débil.

Como se muestra en la Figura 5.89, el anillo colapsa al articularse 3 juntas longitudinales, mismas que son las más cercanas a 0°, 90°, 180° y 270°. El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.90 y se describe a continuación:

- 1.- Se articula la junta J-2 a una carga de 264.08 kN y una distorsión diametral de 0.76%.
- 2.- Se articula la junta J-8 a una carga de 270.68 kN.
- 3.- Se articula la junta J-4 a una carga de 271.88 kN y una distorsión diametral de 0.86%.

5.5.2 Anillo aislado sin revestimiento (posición fuerte) $K=0.93$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a. El propósito de este modelo es determinar la influencia que tiene la posición de las juntas en la capacidad de carga del anillo aislado. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83e. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue aproximadamente constante y de un valor de 2800 kN. En los hastiales, dicha carga fue 2.2% más grande que en la clave y cubeta, como se muestra en la Figura 5.91.

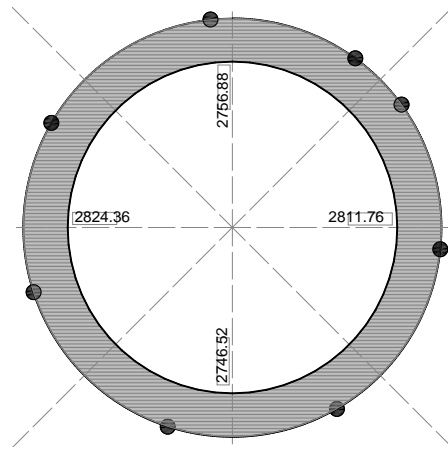


Figura 5.91. Carga axial en revestimiento primario de anillo aislado en posición fuerte

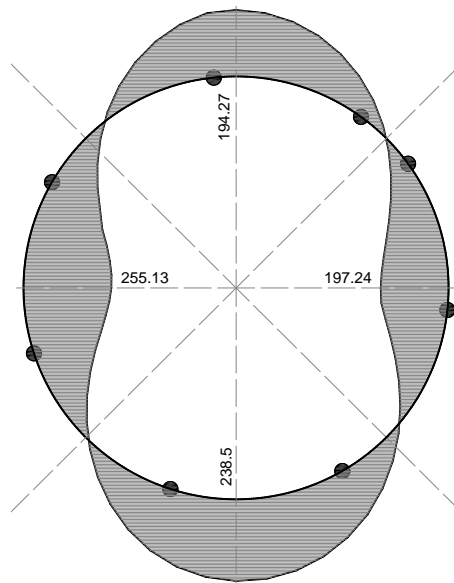


Figura 5.92. Momentos flexionantes en revestimiento primario de anillo aislado en posición fuerte

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.92. La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad de las juntas que, para este caso,

es de aproximadamente 190 kNm (la capacidad de las 8 juntas varía ligeramente debido a que la carga axial que actúa en estas también varía según se observa en la Figura 5.91). De la magnitud de los momentos y la posición de las juntas, se observa que: el hastial izquierdo logró desarrollar más flexión (255.13 kN) comparado con el hastial derecho (197.24 kN) dado que las dos juntas contiguas están más alejadas, permitiendo que la dovela contribuyera en más medida a la resistencia del anillo; la zona de la cubeta desarrolló más capacidad a flexión (238.50 kN) que la zona de la clave (194.27 kN), dado que ésta última tiene la junta más cerca al punto crítico.

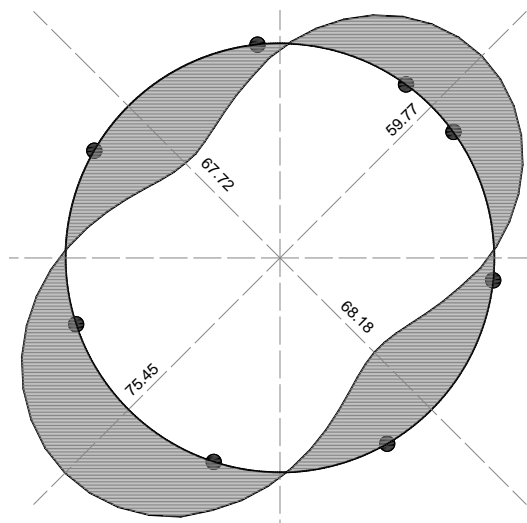


Figura 5.93. Cortantes en revestimiento primario anillo aislado en posición fuerte

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.93. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas.

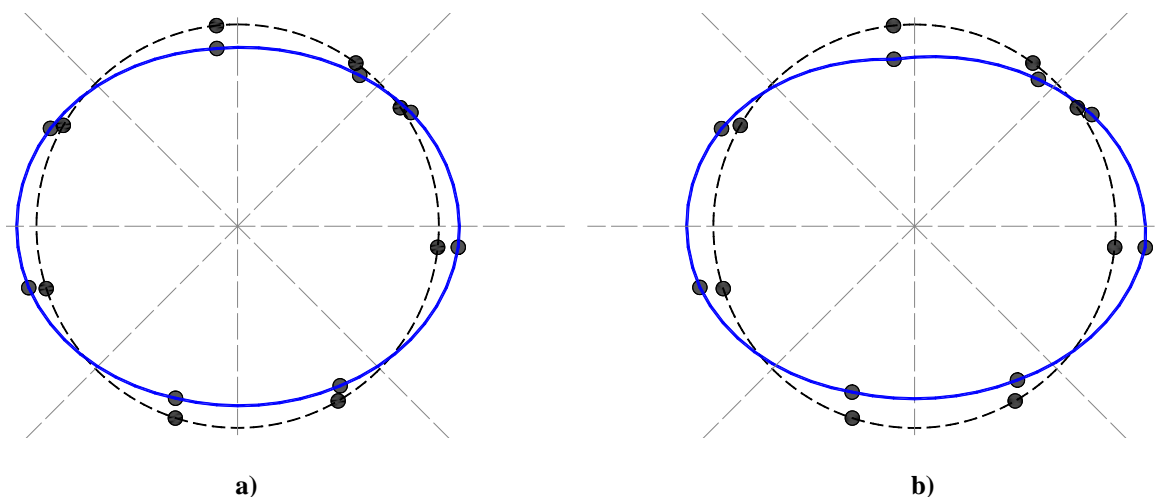


Figura 5.94. Deformadas de anillo aislado en posición fuerte cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.94a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.85%, y la Figura 5.94b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 1.18%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

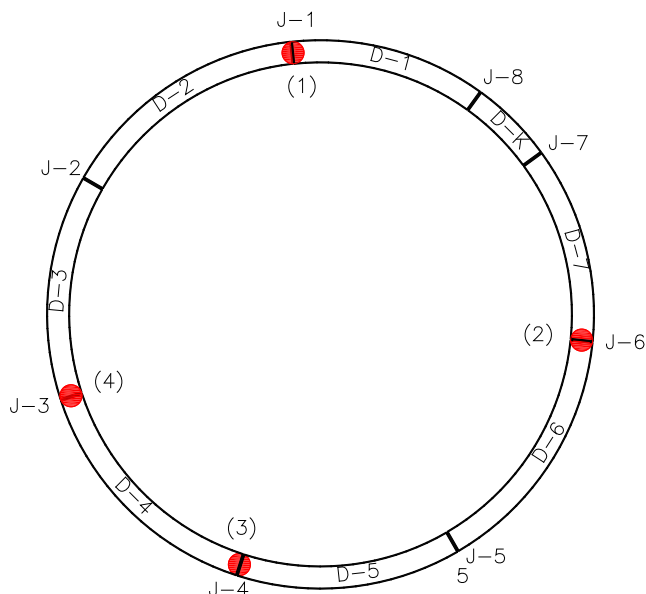


Figura 5.95. Mecanismo de colapso de anillo aislado en posición fuerte

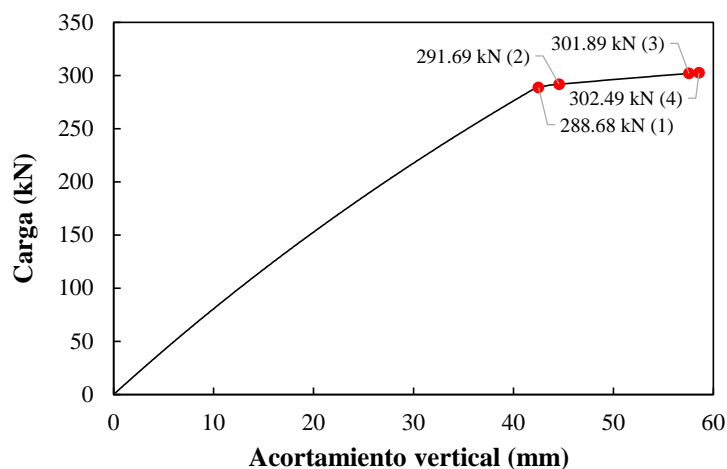


Figura 5.96. Curva de capacidad de anillo aislado en posición fuerte

Como se muestra en la Figura 5.95, el anillo colapsa al articularse 3 juntas longitudinales, mismas que son las más cercanas a 0°, 90°, 180° y 270°. El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.96 y se describe a continuación:

- 1.- Se articula la junta J-1 a una carga de 288.68 kN y una distorsión diametral de 0.85%.
- 2.- Se articula la junta J-6 a una carga de 291.69 kN.

3.- Se articula la junta J-4 a una carga de 301.89 kN.

4.- Se articula la junta J-3 a una carga de 271.88 kN y una distorsión diametral de 1.18%.

5.5.3 3 anillos sin revestimiento (posición débil) $K=0.93$

En este modelo, el anillo etiquetado como “posición débil” (que corresponde al mostrado en la Figura 5.82b se colocó en los extremos del conjunto, de tal manera que se tiene 1 anillo en “posición fuerte” al centro (que corresponden al mostrado en la Figura 5.82a, y 2 anillos en los extremos en “posición débil”. El propósito de este modelo es determinar que influencia tienen la posición de las juntas de los anillos contiguos en la capacidad de carga del anillo analizado. Los anillos están ligados en 2 puntos por dovela, simulando la interacción entre anillos que se genera por el acoplamiento mecánico. Además, sobre los 3 anillos está actuando la misma carga de ovalización mostrada en la Figura 5.83e. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue aproximadamente constante y de un valor de 3100 kN en los anillos exteriores y de 3200 kN en el anillo central, como se muestra en la Figura 5.97.

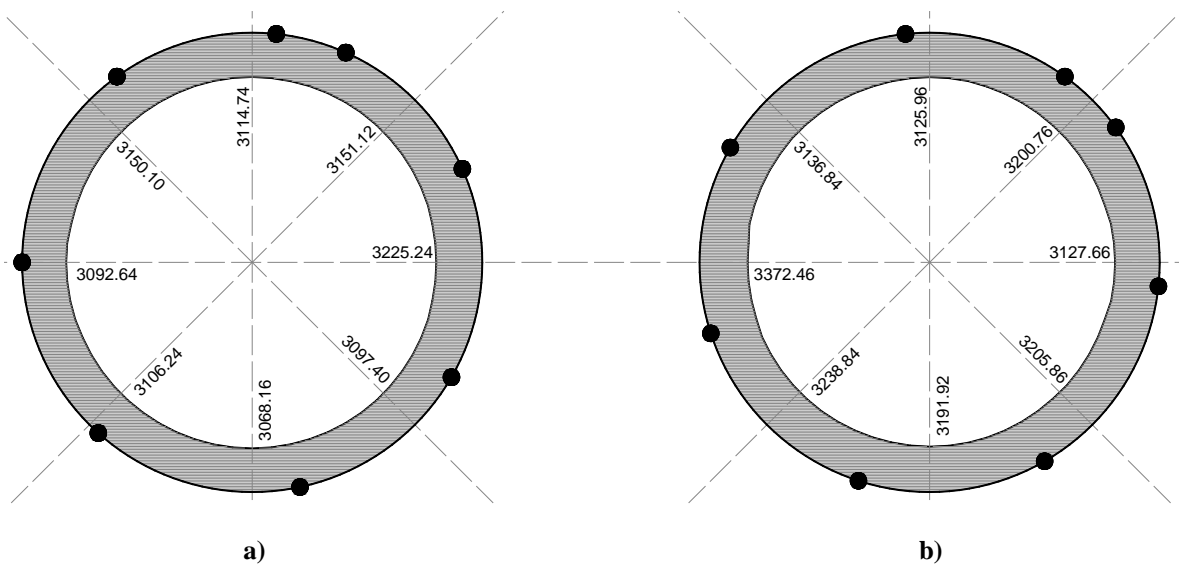


Figura 5.97. Carga axial en revestimiento primario del conjunto de tres anillos “posición débil” en a) anillos exteriores y b) anillo central

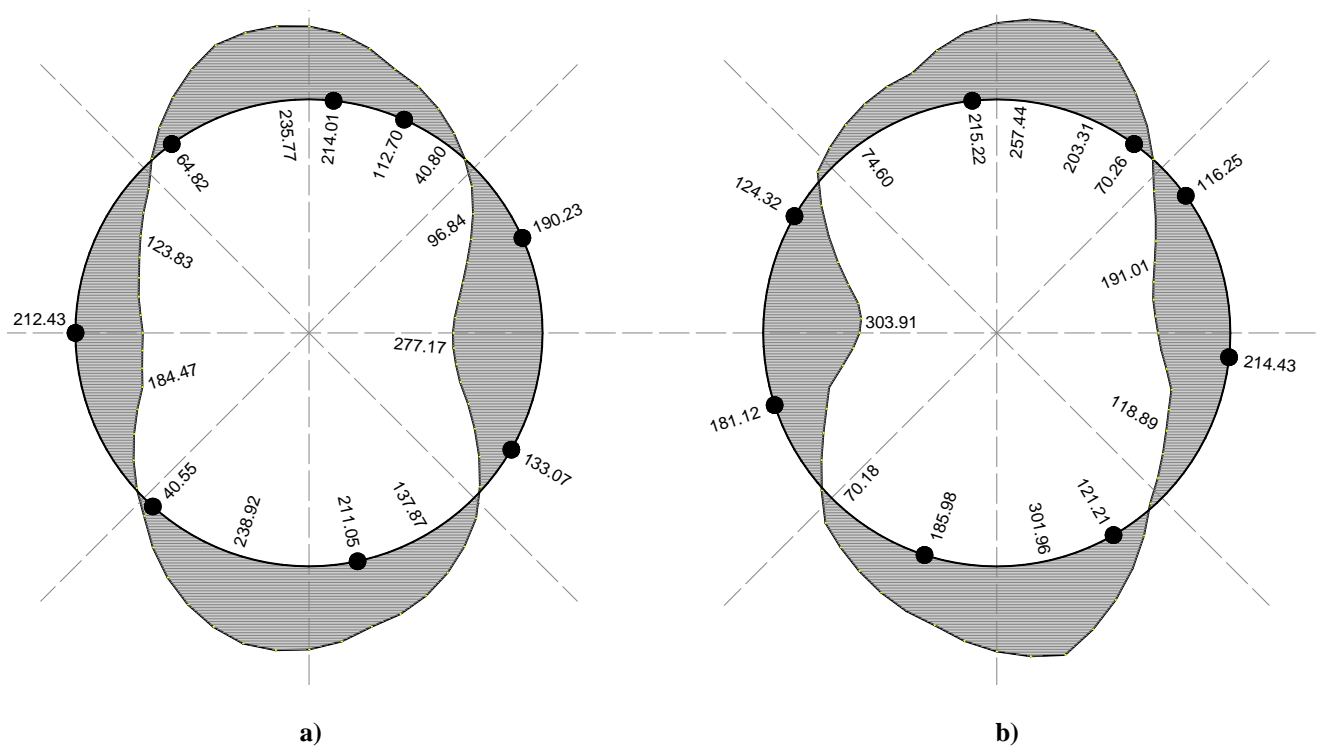


Figura 5.98. Momentos flexionantes en revestimiento primario del conjunto de tres anillos “posición débil” en a) anillos exteriores y b) anillo central

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.98. La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad de las juntas que, para este caso, es de aproximadamente 215 kNm (la capacidad de las 8 juntas varía ligeramente debido a que la carga axial que actúa en estas también varía según se observa en la Figura 5.97). De la magnitud de los momentos y la posición de las juntas, se observa que: en el hastial izquierdo de los anillos exteriores está localizada la junta J-2, y el momento máximo desarrollado en ese punto es el momento plástico de la junta, 212.43 kNm. Al alcanzarse dicho momento, los anillos exteriores se apoyan sobre el anillo central, generando en la dovela un momento flexionante mayor (303.91 kNm) al observado en el anillo aislado en posición fuerte en ese mismo punto (255.13 kNm). De lo anterior se observa que las juntas longitudinales transmiten los momentos flexionantes que ya no pueden tomar a los anillos contiguos, generando mayores demandas de flexión en las dovelas. Sin embargo, la capacidad de las dovelas aún es casi del doble (para este caso), por lo que el mecanismo de colapso sigue ocurriendo por la articulación de las juntas longitudinales.

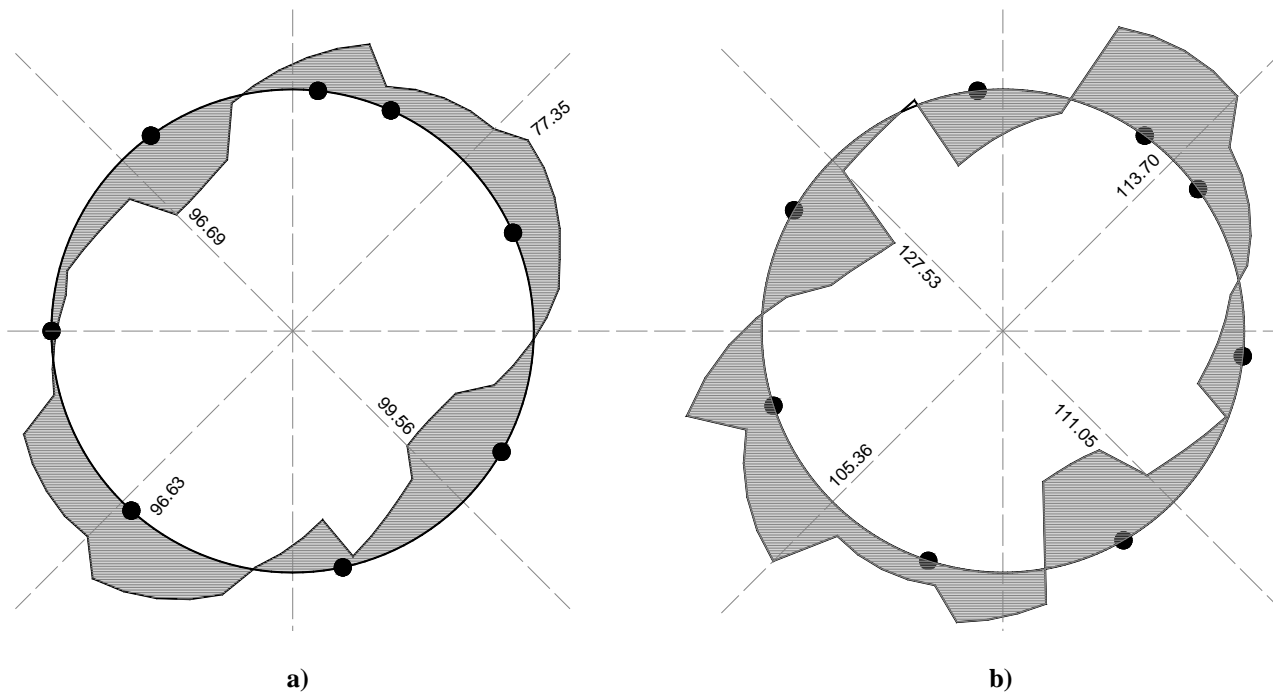


Figura 5.99. Cortantes en revestimiento primario del conjunto de tres anillos “posición débil” en a) anillos exteriores y b) anillo central.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.99. Aunque la forma del diagrama de cortantes tiene la misma tendencia que la del anillo aislado, es muy irregular debido a la presencia de las juntas de los anillos contiguos.

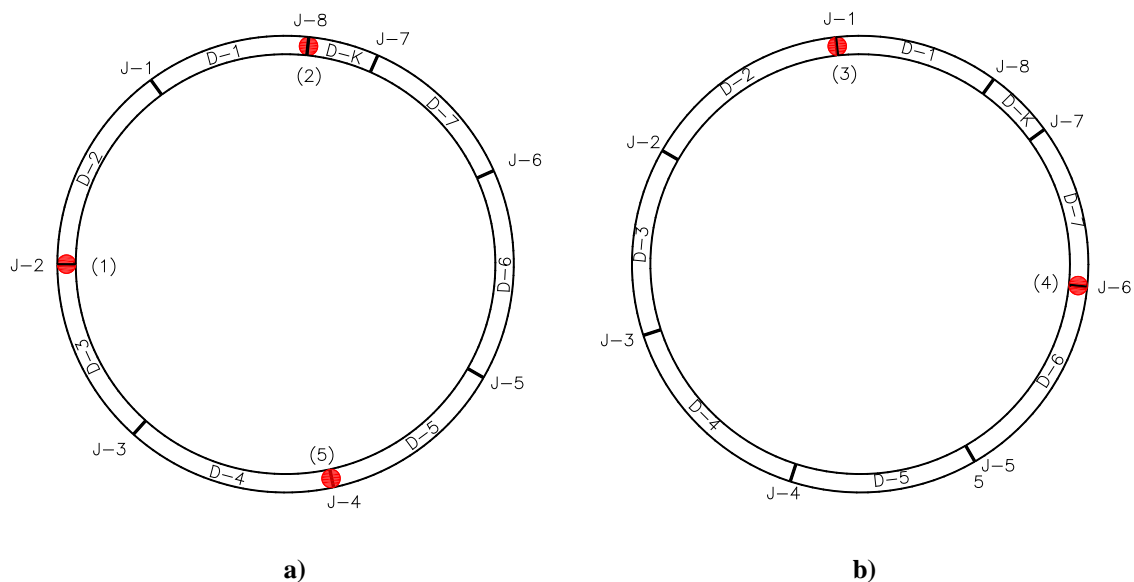


Figura 5.100. Mecanismo de colapso del conjunto de tres anillos sin revestimiento en posición débil ($K=0.93$) a) anillo superior e inferior y b) anillo central.

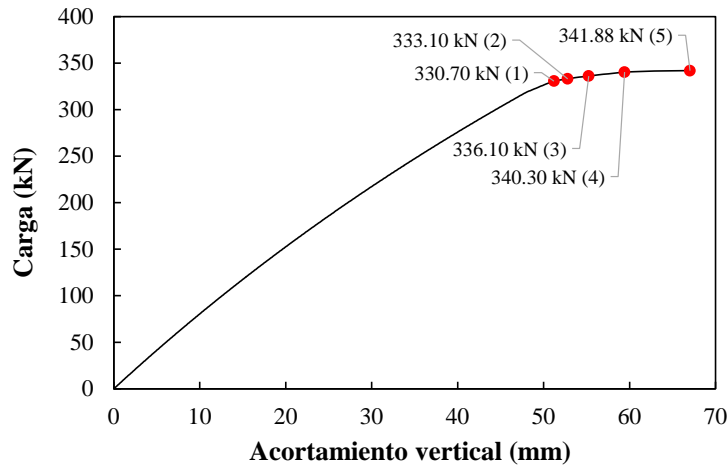


Figura 5.101. Curva de capacidad del conjunto de 3 anillos en posición débil

Como se muestra en la Figura 5.100, el anillo colapsa al articularse 8 juntas longitudinales. Dichas juntas longitudinales corresponden a los puntos más cercanos a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.101 y se describe a continuación:

- 1.- Se articula la junta J-2 del anillo superior e inferior a una carga de 330.70 kN.
- 2.- Se articula la junta J-8 del anillo superior e inferior a una carga de 333.10 kN.
- 3.- Se articula la junta J-1 del anillo central a una carga de 336.10 kN.
- 4.- Se articula la junta J-6 del anillo central a una carga de 340.30 kN.
- 5.- Se articula la junta J-4 del anillo superior e inferior a una carga de 341.88 kN.

5.5.4 3 anillos sin revestimiento (posición fuerte) $K=0.93$

En este modelo, el anillo etiquetado como “posición fuerte” (que corresponde al mostrado en la Figura 5.82a) se colocó en los extremos del conjunto, de tal manera que se tiene 1 anillo en “posición débil” al centro (que corresponden al mostrado en la Figura 5.82b), y 2 anillos en los extremos en “posición fuerte”. El propósito de este modelo es determinar que influencia tienen la posición de las juntas de los anillos contiguos en la capacidad de carga del anillo analizado. Los anillos están ligados en 2 puntos por doveta, simulando la interacción entre anillos que se genera por el acoplamiento mecánico. Además, sobre los 3 anillos está actuando la misma carga de ovalización mostrada en la Figura 5.83e. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue aproximadamente constante y de un valor de 3300 kN en los anillos exteriores y de 3100 kN en el anillo central, como se muestra en la Figura 5.102.

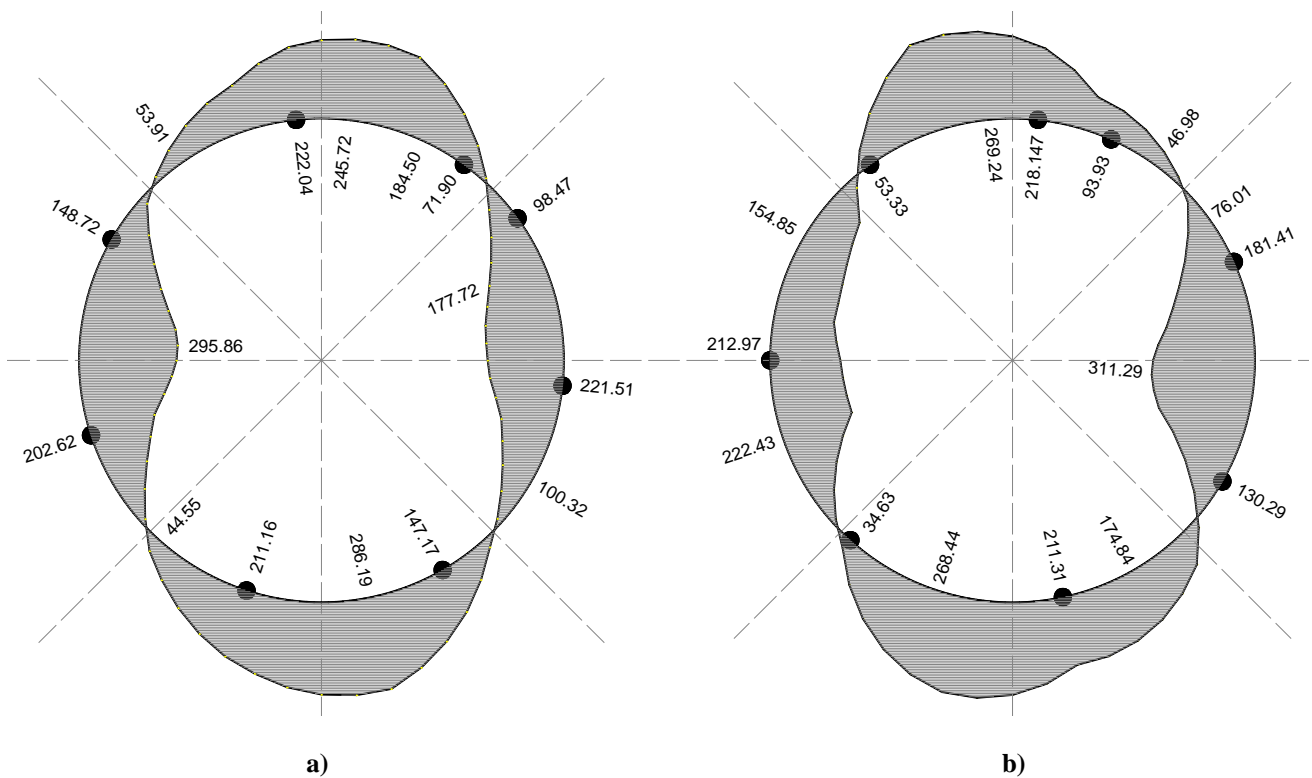
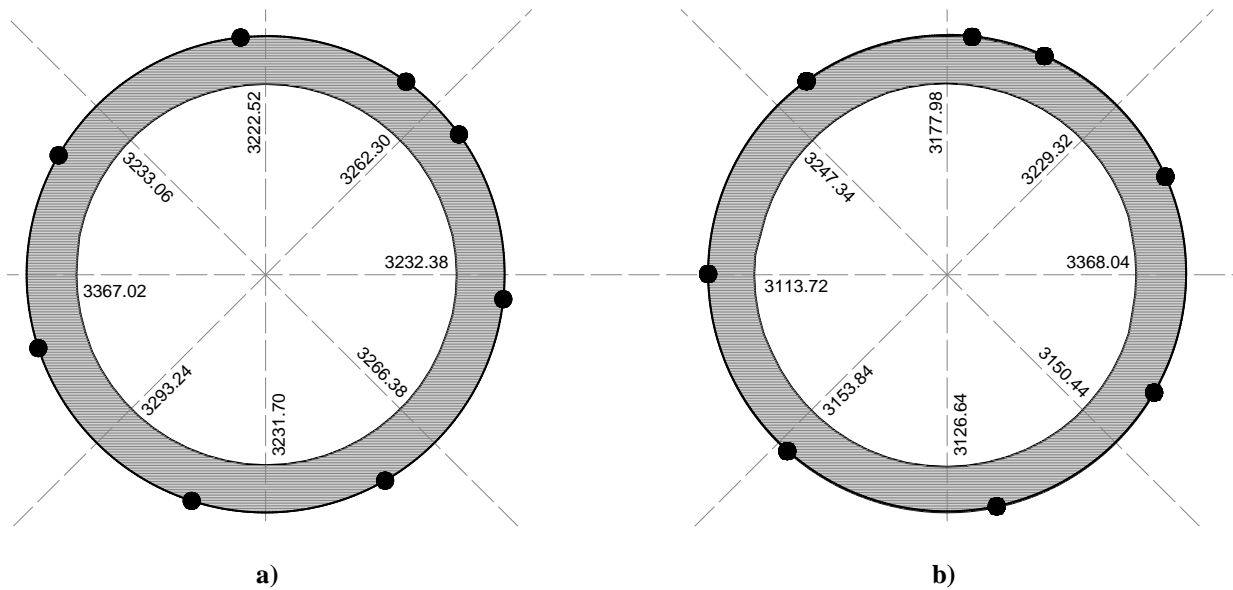


Figura 5.103. Momentos flexionantes en revestimiento primario del conjunto de tres anillos “posición débil” en a) anillos exteriores y b) anillo central

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.103. La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los

momentos máximos quedaron limitados por la capacidad de las juntas que, para este caso, es de aproximadamente 215 kNm (la capacidad de las 8 juntas varía ligeramente debido a que la carga axial que actúa en estas también varía según se observa en la Figura 5.102). De la magnitud de los momentos y la posición de las juntas, se observa que: en el hastial izquierdo del anillo central está localizada la junta J-2, y el momento máximo desarrollado en ese punto es el momento plástico de la junta, 212.97 kNm. Al alcanzarse dicho momento, el anillo central se apoya en los anillos exteriores, generando en la dovela un momento flexionante mayor (295.86 kNm) al observado en el anillo aislado en posición fuerte en ese mismo punto (255.13 kNm). Además, en el hastial derecho del anillo central también se desarrolló un momento flexionante mayor (311.29 kNm) que el desarrollado en el anillo aislado en “posición débil” (203.22 kNm). De lo anterior se observa que las juntas longitudinales transmiten los momentos flexionantes que ya no pueden tomar a los anillos contiguos, generando mayores demandas de flexión en las dovelas. Sin embargo, la capacidad de las dovelas aún es casi del doble (para este caso), por lo que el mecanismo de colapso sigue ocurriendo por la articulación de las juntas longitudinales.

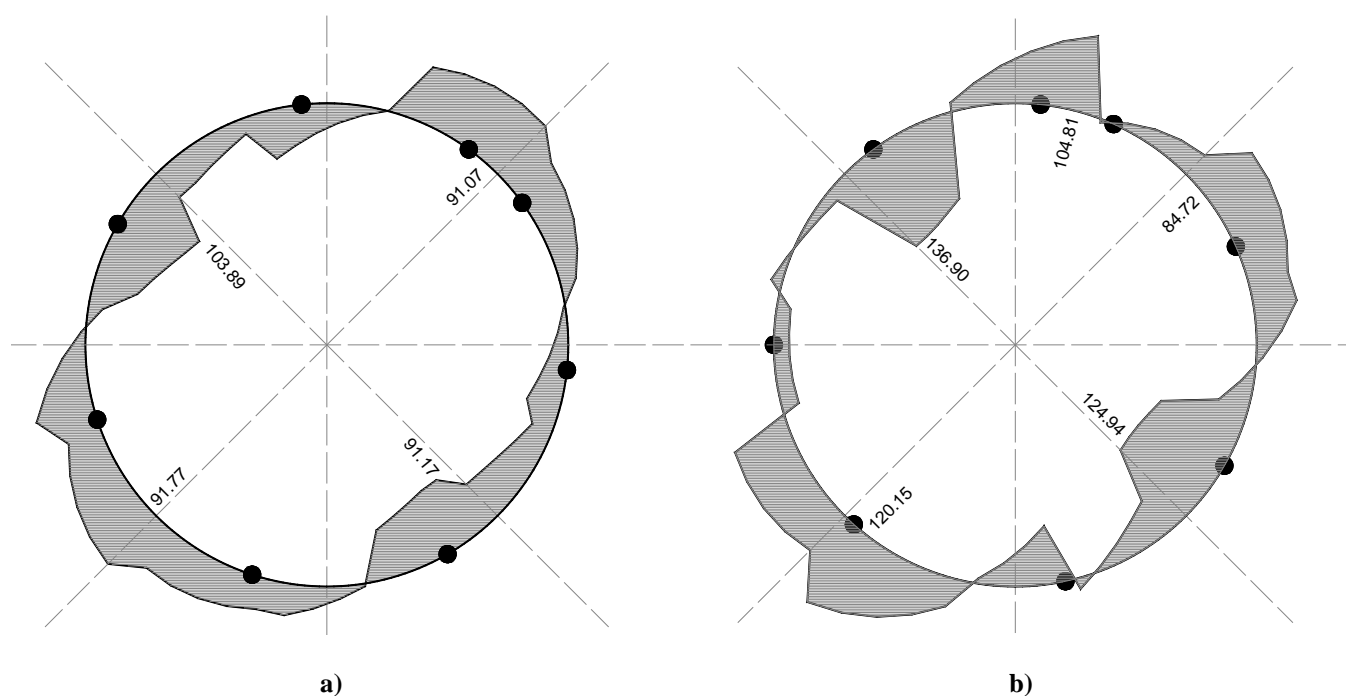


Figura 5.104. Cortantes en revestimiento primario del conjunto de tres anillos “posición fuerte” en a) anillos exteriores y b) anillo central.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.104. Aunque la forma del diagrama de cortantes tiene la misma tendencia que la del anillo aislado, es muy irregular debido a la presencia de las juntas de los anillos contiguos. También es evidente que los cortantes máximos son casi del

doble comparados con los desarrollados en los anillos aislados (sin considerar la interacción entre anillos contiguos).

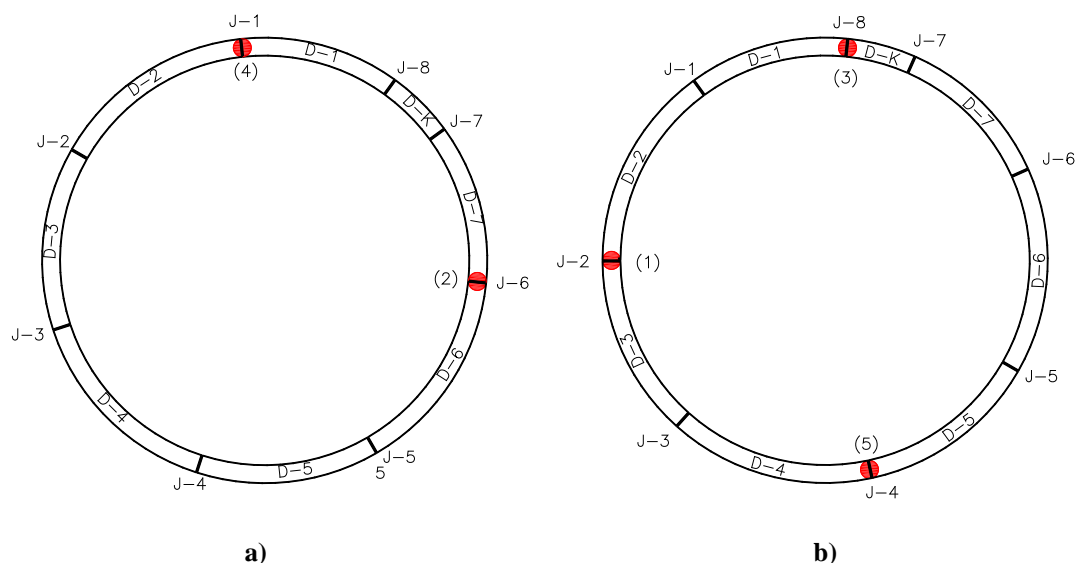


Figura 5.105. Mecanismo de colapso de conjunto de tres anillos sin revestimiento en posición fuerte ($K=0.93$) a) anillos superior e inferior y b) anillo central.

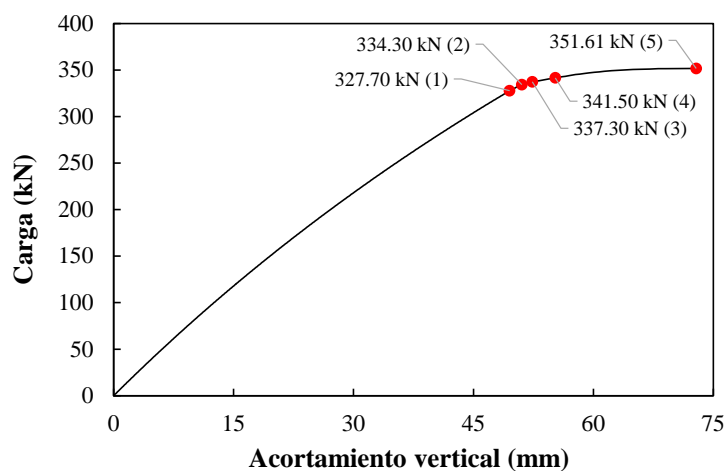


Figura 5.106. Curva de capacidad del conjunto de 3 anillos en posición fuerte

Como se muestra en la Figura 5.105, el anillo colapsa al articularse 7 juntas longitudinales. Dichas juntas longitudinales corresponden a los puntos más cercanos a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.106 y se describe a continuación:

- 1.- Se articula la junta J-2 del anillo central a una carga de 327.70 kN.
- 2.- Se articula la junta J-6 del anillo superior e inferior a una carga de 334.30 kN.
- 3.- Se articula la junta J-8 del anillo central a una carga de 337.30 kN.

4.- Se articula la junta J-1 del anillo superior e inferior a una carga de 341.50 kN.

5.- Se articula la junta J-4 del anillo central a una carga de 351.61 kN.

5.5.5 Anillo aislado continuo sin revestimiento $K=0.93$

En la práctica, se modela el anillo de dovelas como un anillo continuo, reduciendo su rigidez para tomar en cuenta la presencia de las juntas longitudinales, que flexibilizan el anillo. El propósito de este modelo es determinar la capacidad de carga y mecanismo de colapso del anillo suponiendo que fuera continuo (sin la presencia de las juntas longitudinales). La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue aproximadamente constante y de un valor de 5300 kN (aproximadamente el doble que la desarrollada en el modelo con juntas longitudinales). En los hastiales, dicha carga fue 2.4% más grande que en la clave y cubeta, como se muestra en la Figura 5.107.

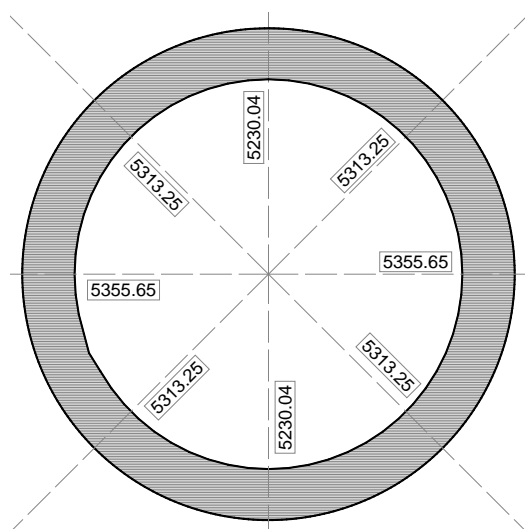


Figura 5.107. Carga axial en anillo aislado continuo

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.108. La magnitud de estos momentos es simétrica en el anillo, pues las características del mismo y las cargas son simétricas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del anillo de concreto que, para este caso, es de aproximadamente 765 kNm (la capacidad a flexión del anillo varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.107).

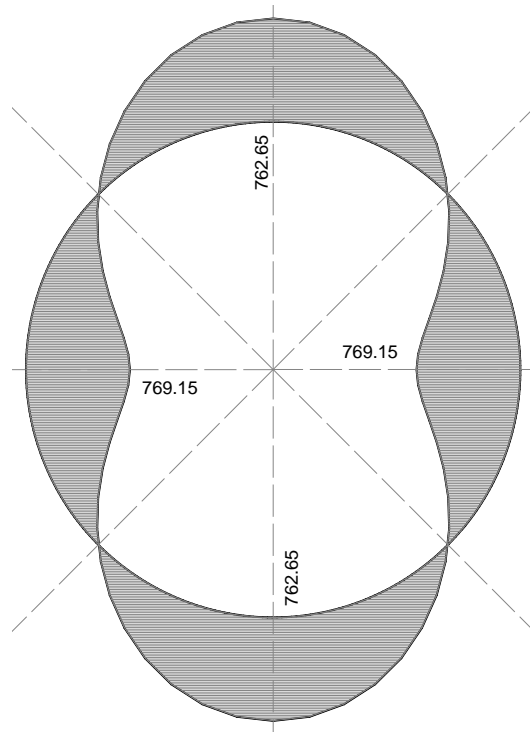


Figura 5.108. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo

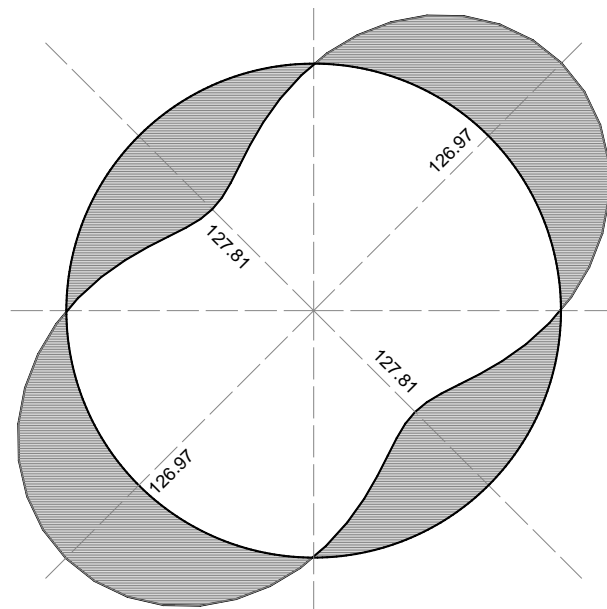


Figura 5.109. Cortantes en anillo aislado continuo

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.109. La magnitud de estos cortantes es simétrica en el anillo ya que las características del mismo y las cargas son también simétricas.

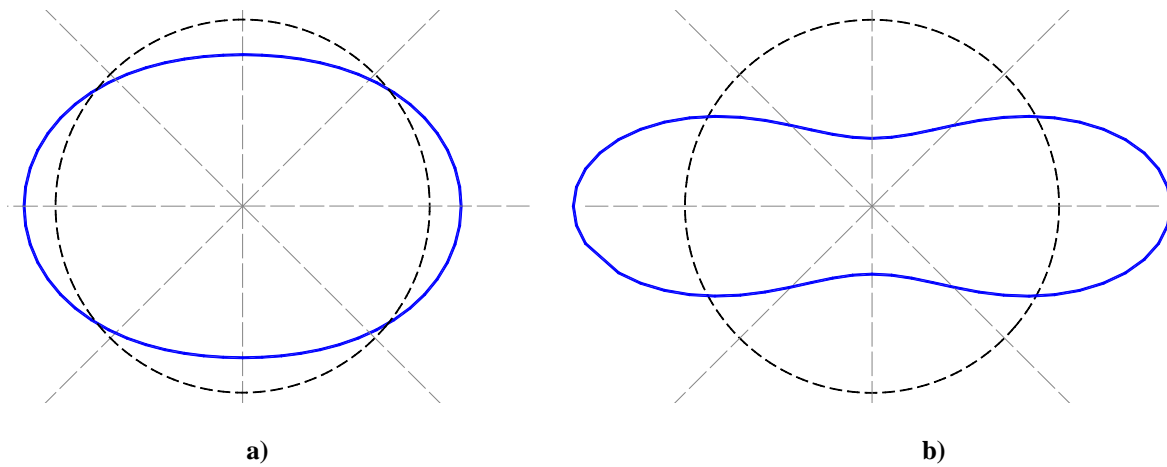


Figura 5.110. Deformadas de anillo aislado continuo cuando ocurre: a) Primer articulación y b) Colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.110a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 1.43%, y la Figura 5.110b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 5.06%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

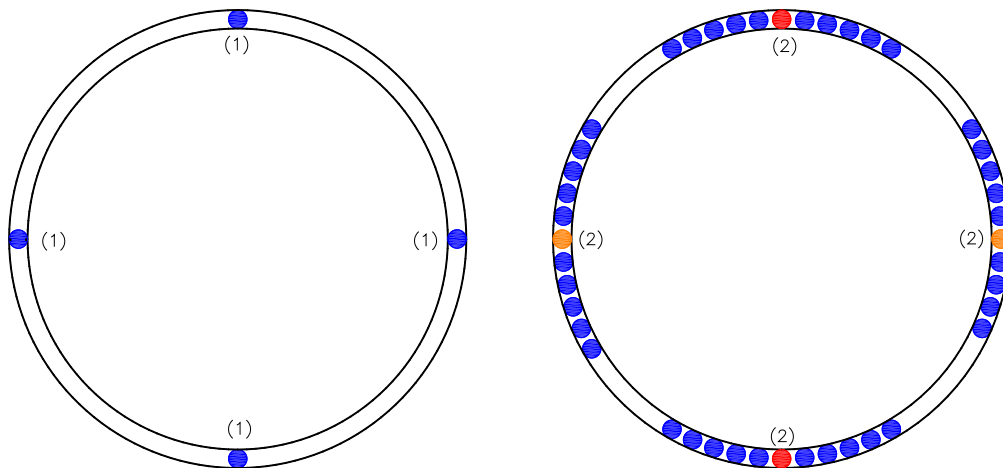


Figura 5.111. Mecanismo de colapso de anillo aislado continuo.

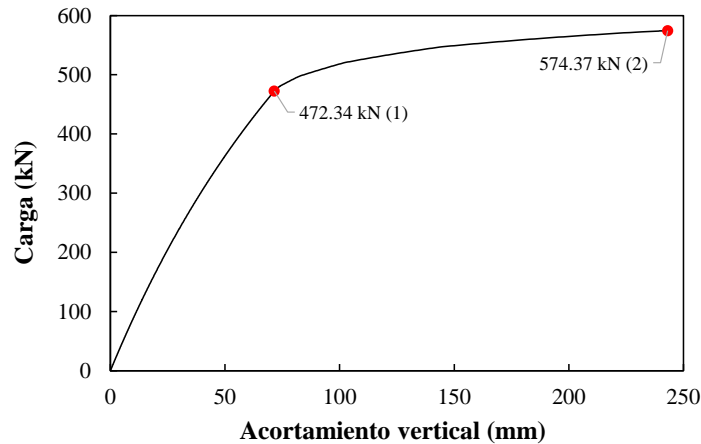


Figura 5.112. Curva de capacidad de anillo aislado continuo.

Como se muestra en la Figura 5.111, el anillo colapsa al articularse 2 puntos en clave y cubeta, quedando dos puntos muy cercanos a la plastificación en los hastiales. Dichos puntos están localizados exactamente a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.112 y se describe a continuación:

- 1.- Se agrieta la zona central de clave y cubeta a una carga de 472.34 kN y una distorsión diametral de 1.43%.
- 2.- Se articula la zona central de clave y cubeta a una carga de 574.37 kN y una distorsión diametral de 5.06%.

5.5.6 Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.93$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a (se tomó la posición fuerte). El propósito de este modelo es determinar la influencia que tiene el revestimiento secundario en la rigidez del anillo de dovelas, considerando la presencia de las juntas en el modelo. Dado que este anillo no se llevó al colapso, solo se muestra parte de su curva de capacidad.

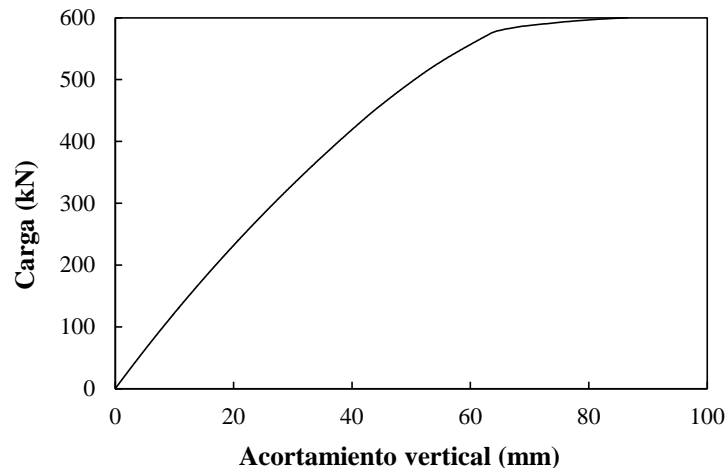


Figura 5.113. Curva de capacidad de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.93$)

5.5.7 Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.93$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a (se tomó la posición fuerte). El propósito de este modelo es determinar la influencia que tiene el revestimiento secundario en la rigidez del anillo de dovelas, ignorando la presencia de las juntas en el modelo. Dado que este anillo no se llevó al colapso, solo se muestra parte de su curva de capacidad.

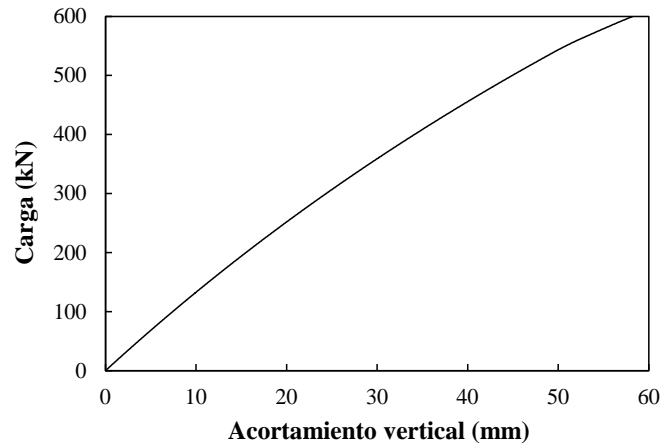


Figura 5.114. Curva de capacidad de anillo aislado sin juntas y revestimiento ($K=0.93$)

5.5.8 Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.85$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a. El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se toma en cuenta la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83d. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 1370 kN en el revestimiento primario, y de 533 kN en el revestimiento secundario, como se muestra en la Figura 5.115.

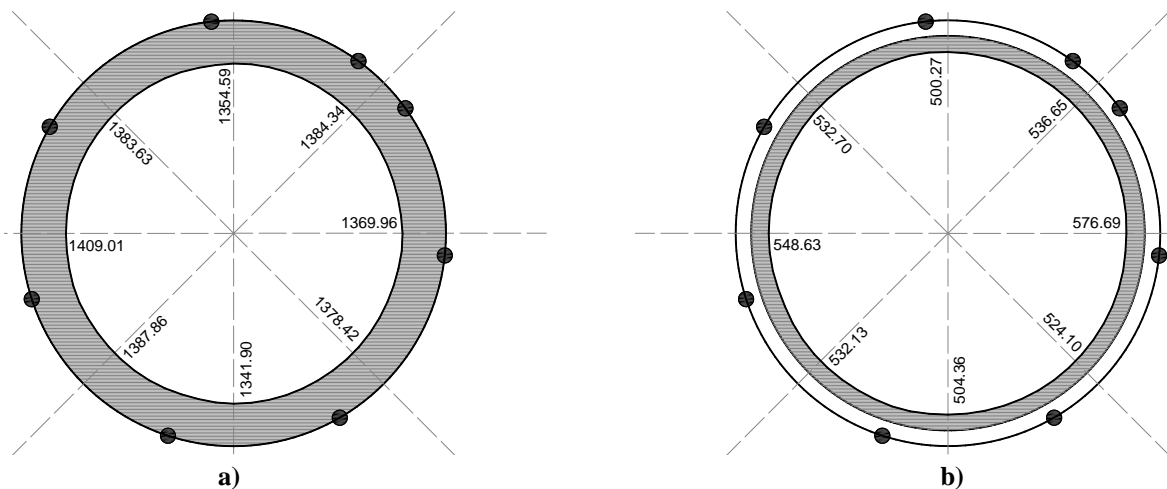


Figura 5.115. Carga axial en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

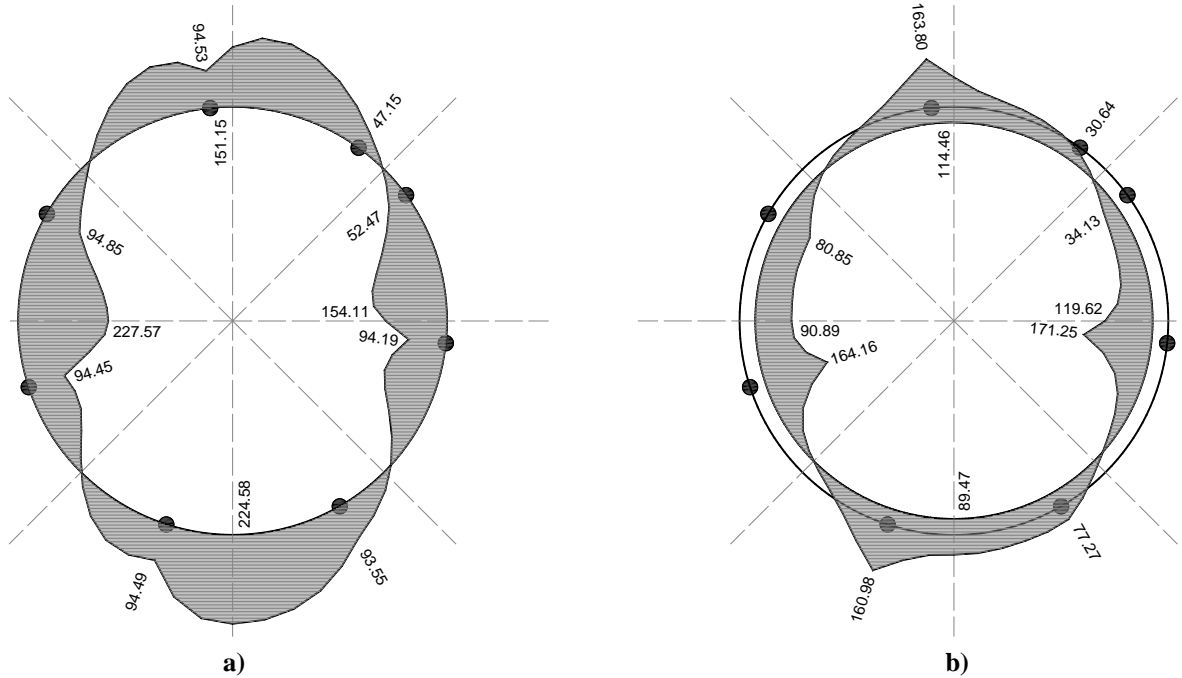
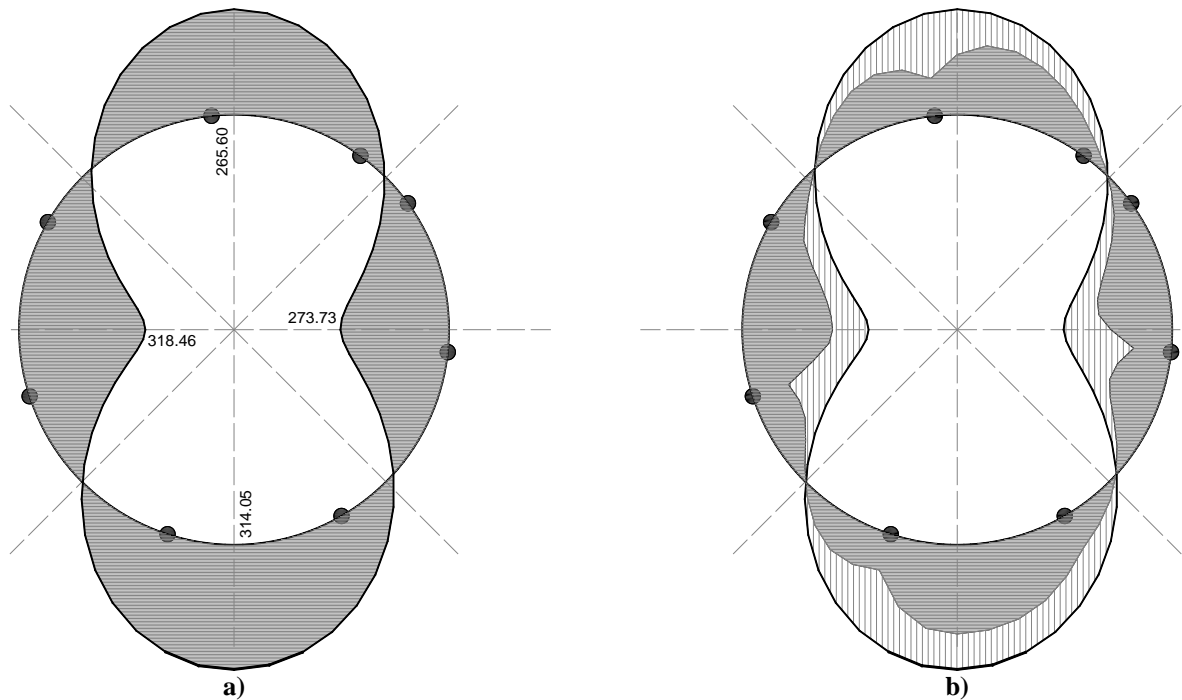


Figura 5.116. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

En los diagramas de momentos flexionantes mostrados en la Figura 5.116 se observa que aunque algunas juntas longitudinales alcanzaron el momento plástico, que para este caso es de aproximadamente 94 kNm, el revestimiento primario tiene la capacidad de seguir absorbiendo momentos flexionantes ya que el revestimiento secundario resiste la flexión que no puede ser tomada por las juntas, como lo muestran los picos de los momentos máximos en la Figura 5.116b.



**Figura 5.117. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$).
a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.**

Al sumar los momentos flexionantes de ambos revestimientos, como lo muestra la Figura 5.117, los momentos flexionantes máximos en el anillo de doble revestimiento se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° . La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 165 kNm (la capacidad a flexión del revestimiento secundario varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.115).

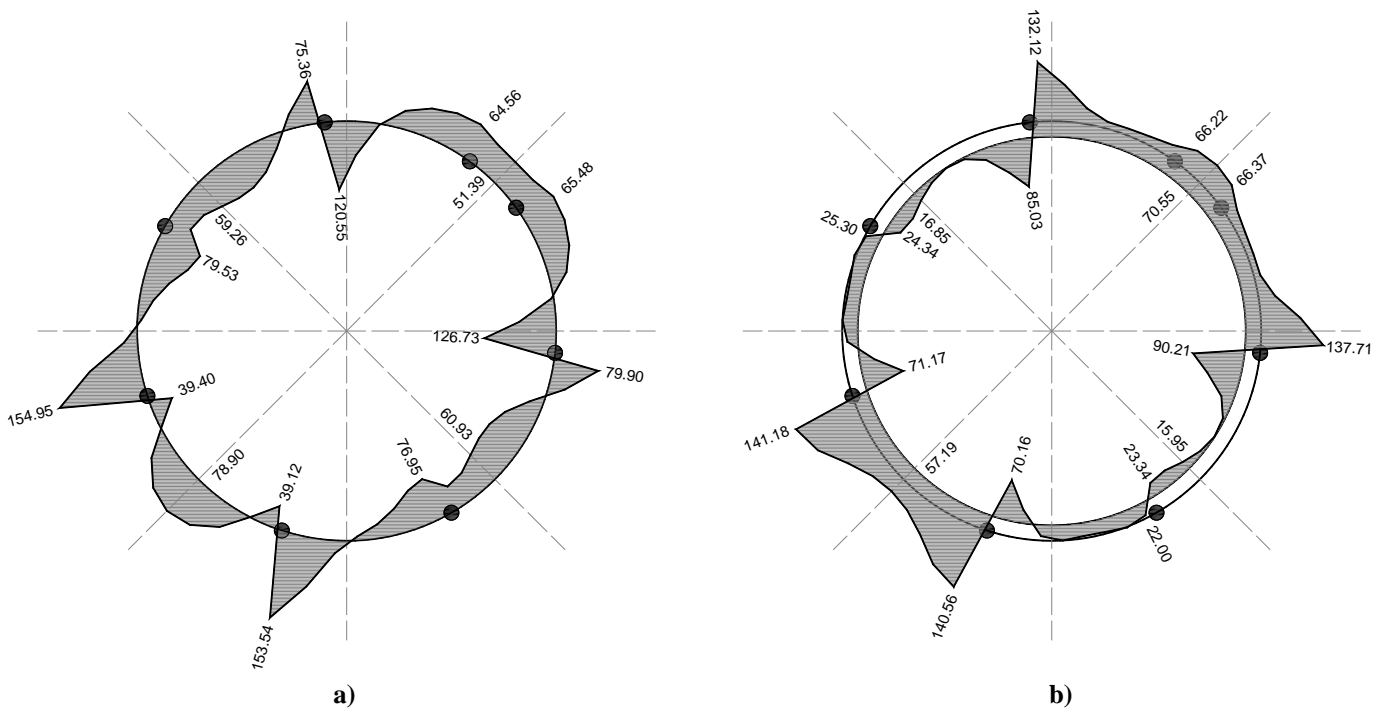


Figura 5.118. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.119. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. En la Figura 5.118 se muestra la magnitud de los cortantes que absorbieron ambos revestimientos por separado. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° .

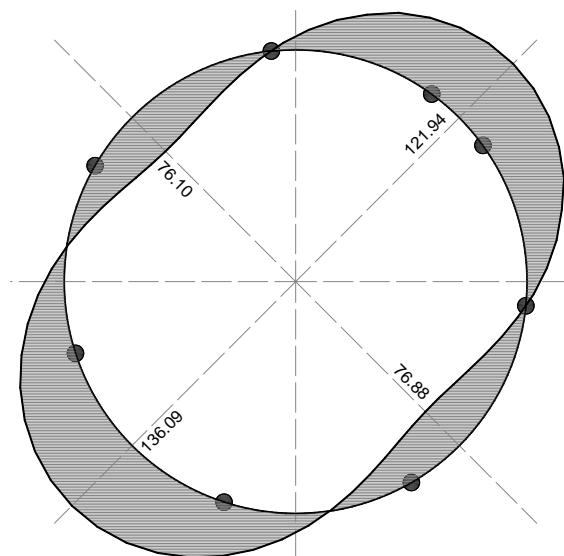


Figura 5.119. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$). Suma de ambos revestimientos.

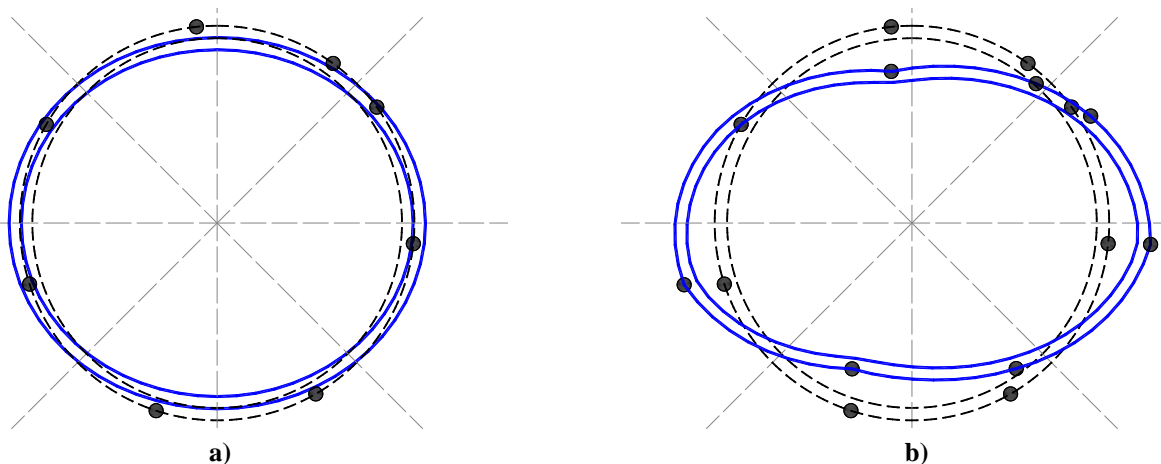


Figura 5.120. Deformadas de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.120a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.48%, y la Figura 5.120b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 1.73%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

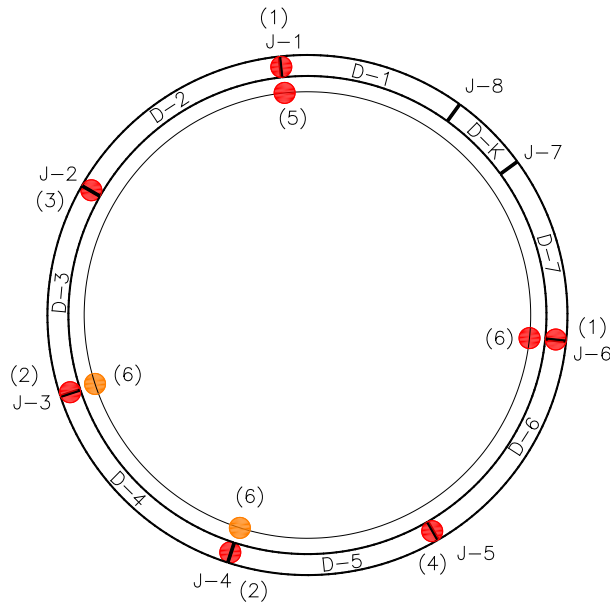


Figura 5.121. Mecanismo de colapso de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$)

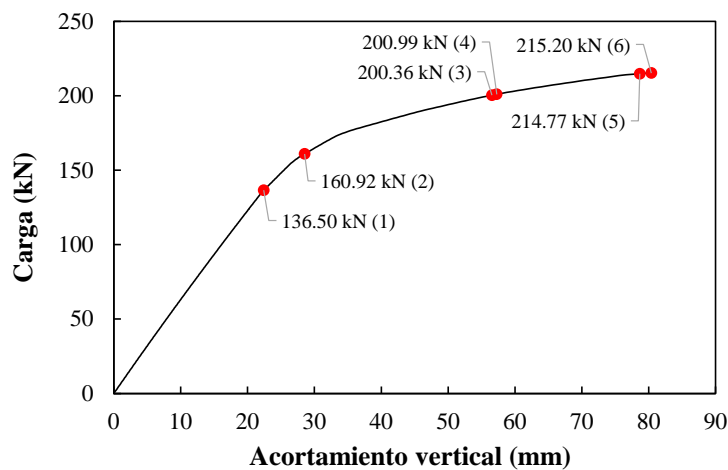


Figura 5.122. Curva de capacidad de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.85$)

Como se muestra en la Figura 5.121, el anillo colapsa al articularse 2 puntos en el revestimiento secundario y quedando otros 2 puntos muy cercanos al momento plástico. Los 4 puntos corresponden con 4 juntas longitudinales del revestimiento primario, mismas que son las más cercanas a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.122 y se describe a continuación:

- 1.- Se articulan juntas J-1 y J-6 a una carga de 136.50 kN y una distorsión diametral de 0.48%.
- 2.- Se articulan J-3 y J-4 a una carga de 160.92 kN.
- 3.- Se articula J-2 a una carga de 200.36 kN.

4.- Se articula J-5 a una carga de 200.99 kN.

5.- Se articula revestimiento secundario a la altura de la junta J-1 a una carga de 214.77 kN.

6.- Se articula revestimiento secundario a la altura de la junta J-6 y quedan puntos muy cercanos a alcanzar su plastificación a la altura de las juntas J-3 y J-4 a una carga de 215.20 kN y una distorsión diametral de 1.73%.

5.5.9 Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.85$

El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se ignora la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, considerándolo como un anillo continuo, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83d. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 2800 kN en el revestimiento primario, y de 1020 kN en el revestimiento secundario. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total. En los hastiales, dicha carga fue aproximadamente 4% y 10% más grande que en la clave y cubeta (en revestimiento primario y secundario, respectivamente), como se muestra en la Figura 5.123.

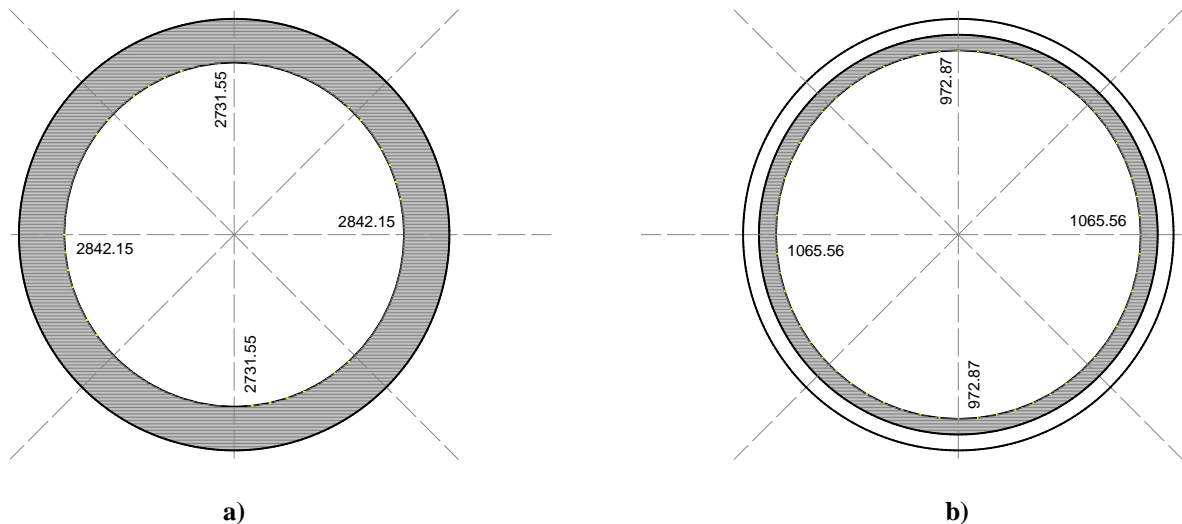


Figura 5.123. Carga axial en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

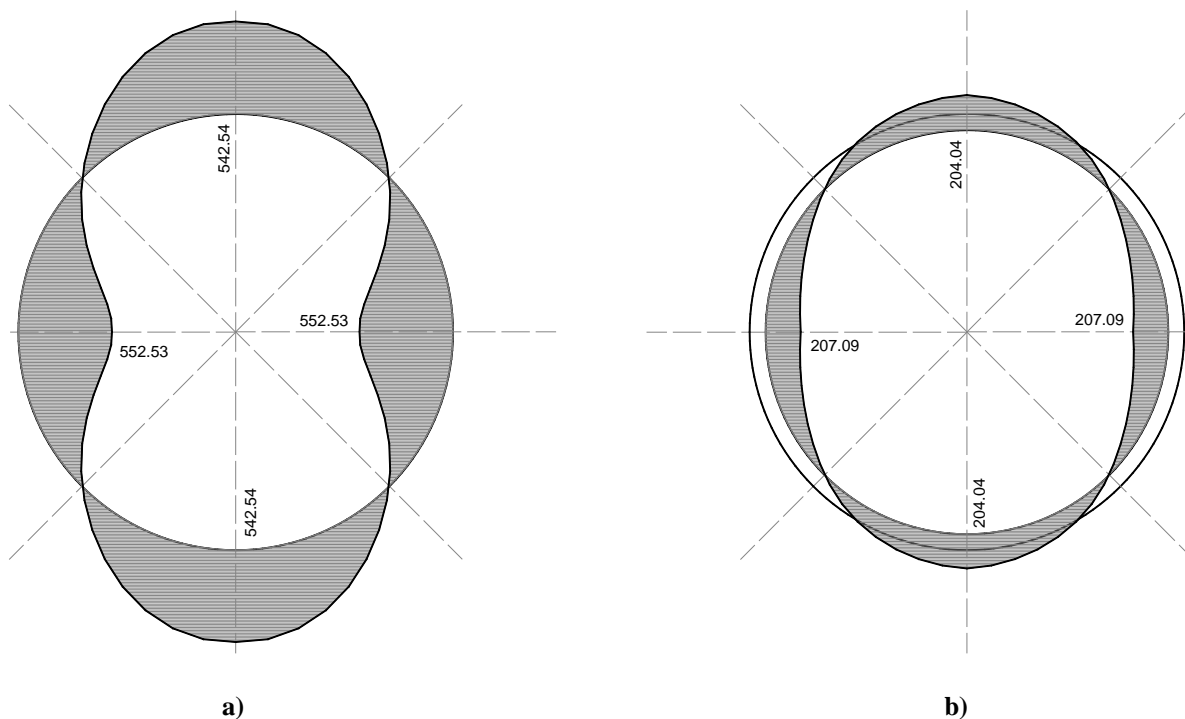


Figura 5.124. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.124. La magnitud de estos momentos es simétrica en el anillo, pues las características del mismo y las cargas son simétricas. Los momentos flexionantes del revestimiento secundario fueron aproximadamente el 27% de los momentos flexionantes totales. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 207 kNm (la capacidad a flexión del anillo varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.123). No obstante, el revestimiento primario también alcanzó el momento plástico en algunos puntos, que para este caso es de 545 kNm. En la Figura 5.125 se observa el diagrama de momentos flexionantes totales y la contribución de ambos revestimientos por separado.

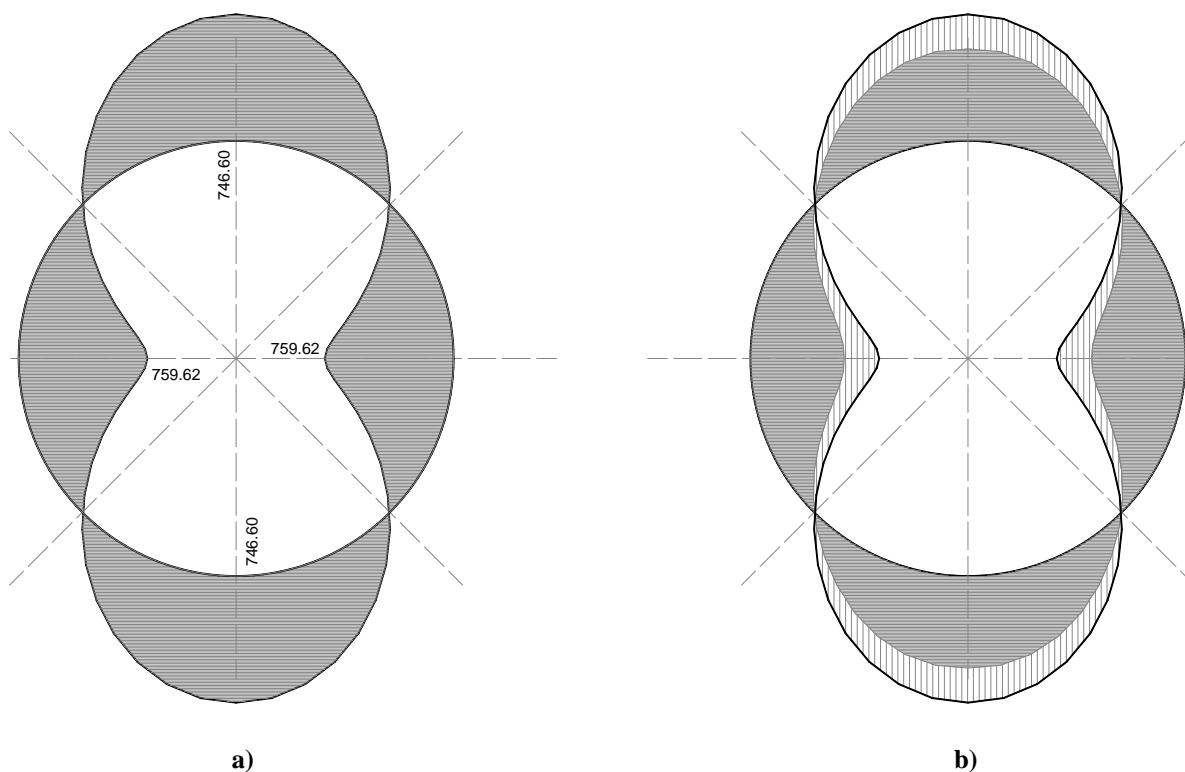


Figura 5.125. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.126. La magnitud de estos cortantes es simétrica en el anillo ya que las características del mismo y las cargas son también simétricas. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° , como se muestra en la Figura 5.127.

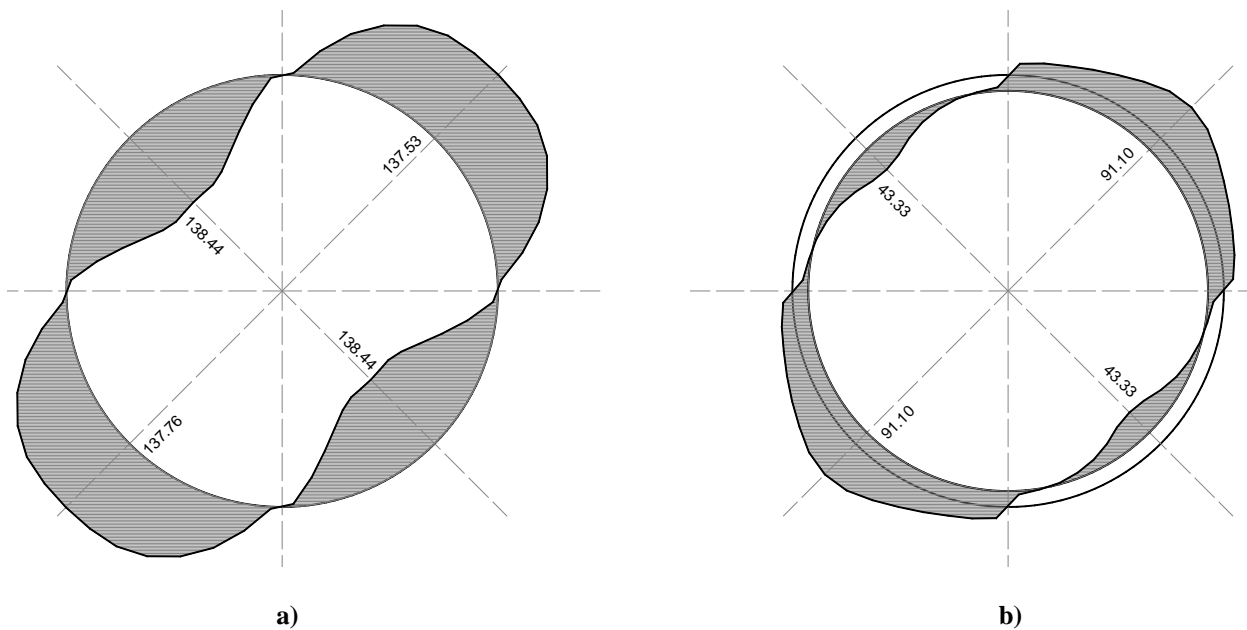


Figura 5.126. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

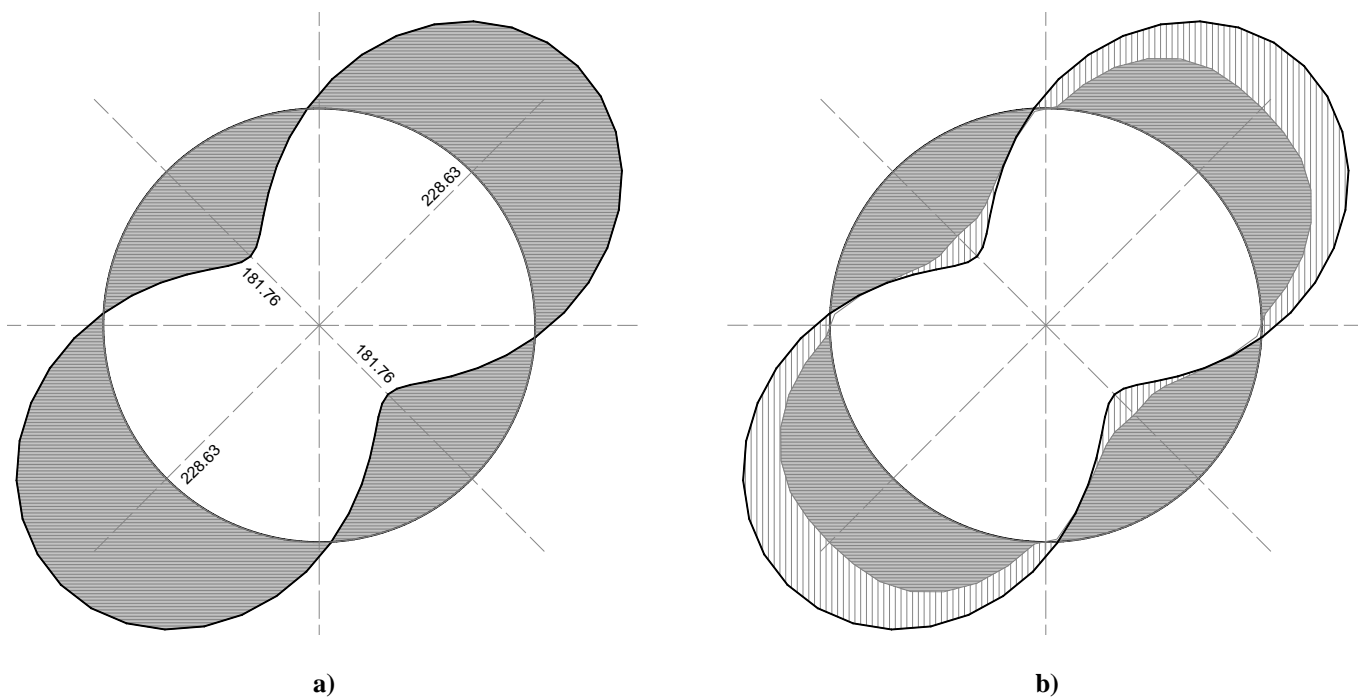


Figura 5.127. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$). a) suma de los cortantes de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

La Figura 5.128a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.87%, y la Figura 5.128b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 4.32%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

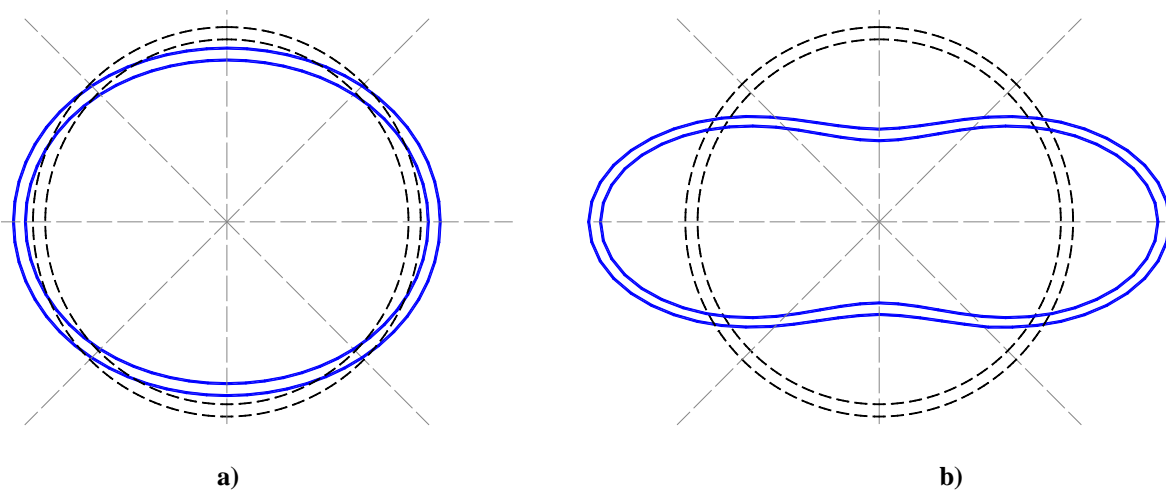


Figura 5.128. Deformadas de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

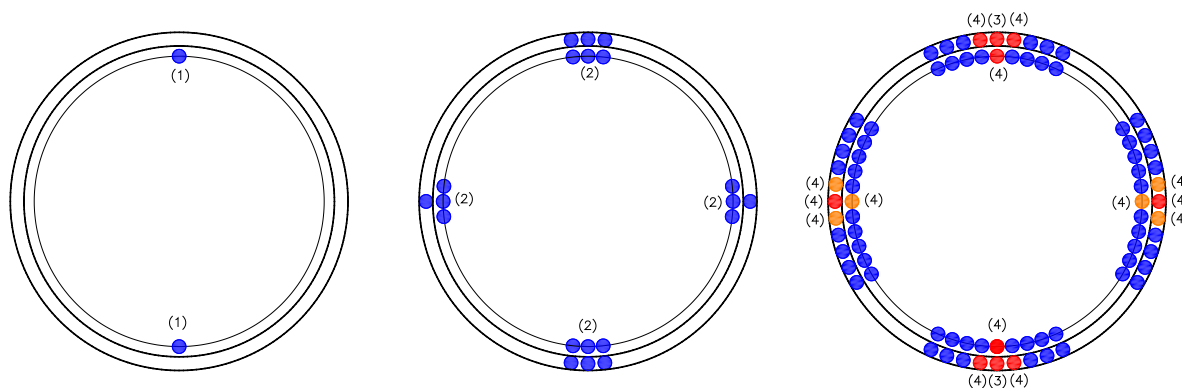


Figura 5.129. Mecanismo de colapso de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$)

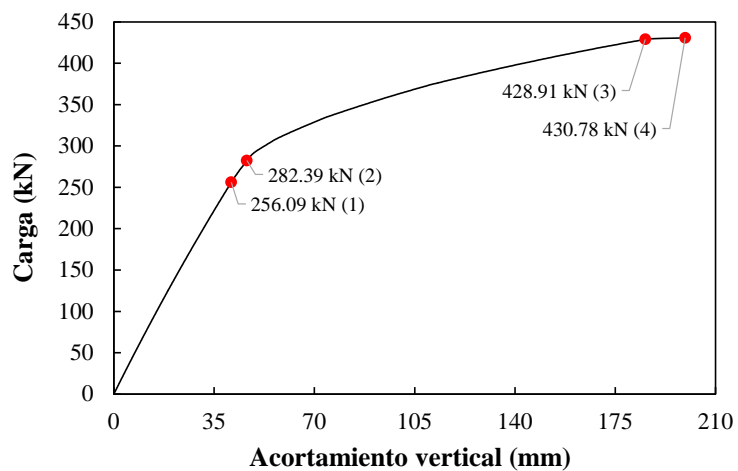


Figura 5.130. Curva de capacidad de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.85$)

Como se muestra en la Figura 5.129, el anillo colapsa al articularse 4 puntos en el revestimiento primario y 2 puntos en el revestimiento secundario en clave y cubeta, quedando además otros 2 puntos muy cercanos al momento plástico en los hastiales. Dichos puntos están localizados exactamente a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.130 y se describe a continuación:

- 1.- Comienza a agrietarse el revestimiento secundario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 256.09 kN y una distorsión diametral de 0.87%.
- 2.- Se agrieta el revestimiento secundario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 282.39 kN.
- 3.- Se articula el revestimiento primario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 428.91 kN.
- 4.- Se articula el revestimiento secundario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 430.78 kN y una distorsión diametral de 4.32%.

5.5.10 Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.80$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a. El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se toma en cuenta la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83c. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 890 kN en el revestimiento primario, y de 345 kN en el revestimiento secundario, como se muestra en la Figura 5.131. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total.

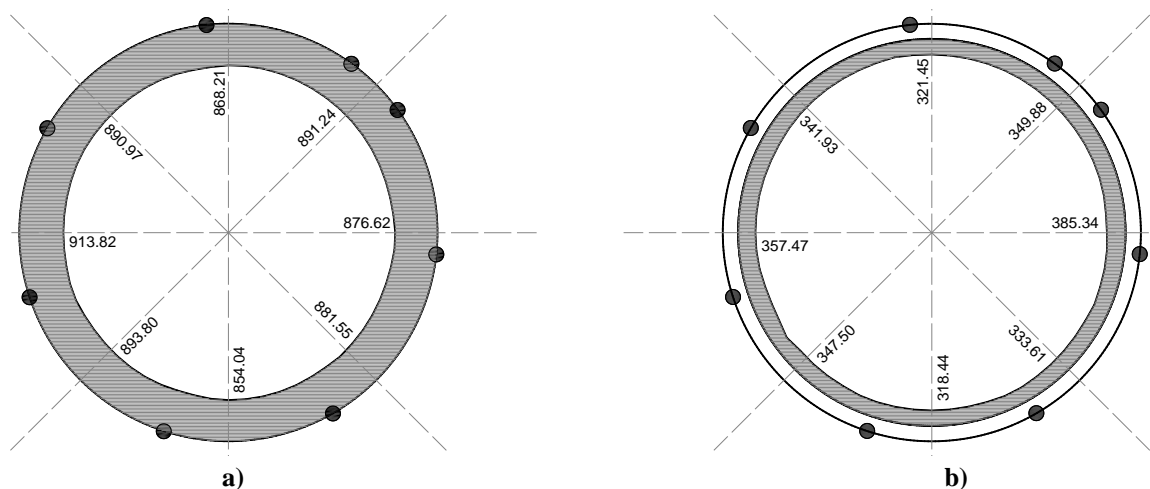


Figura 5.131. Carga axial en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

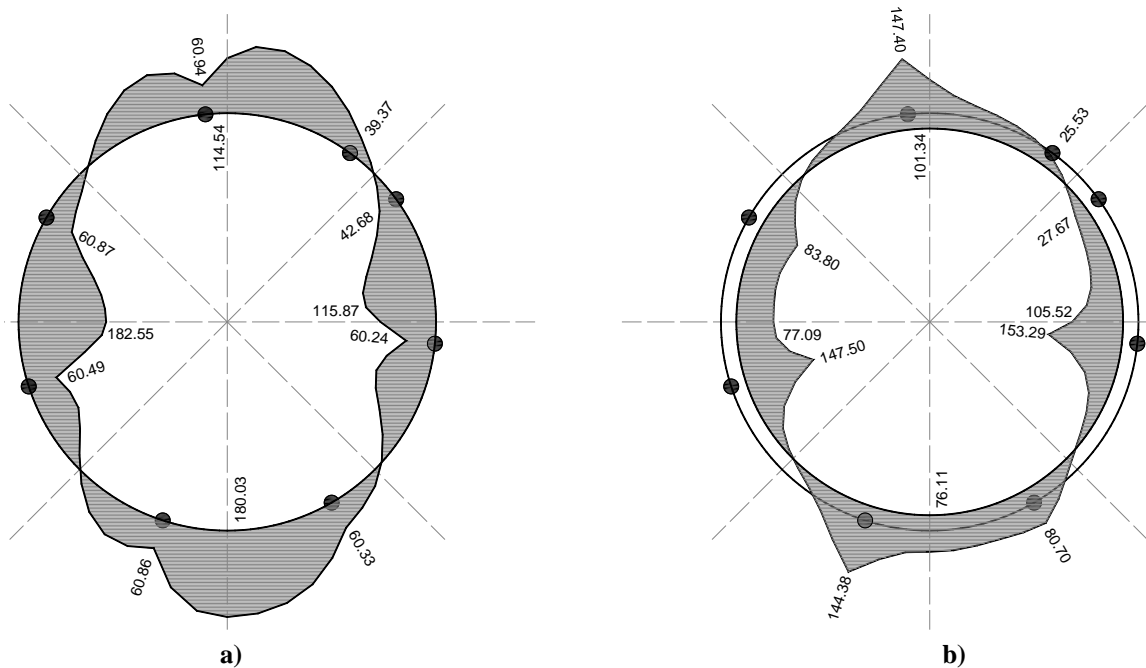
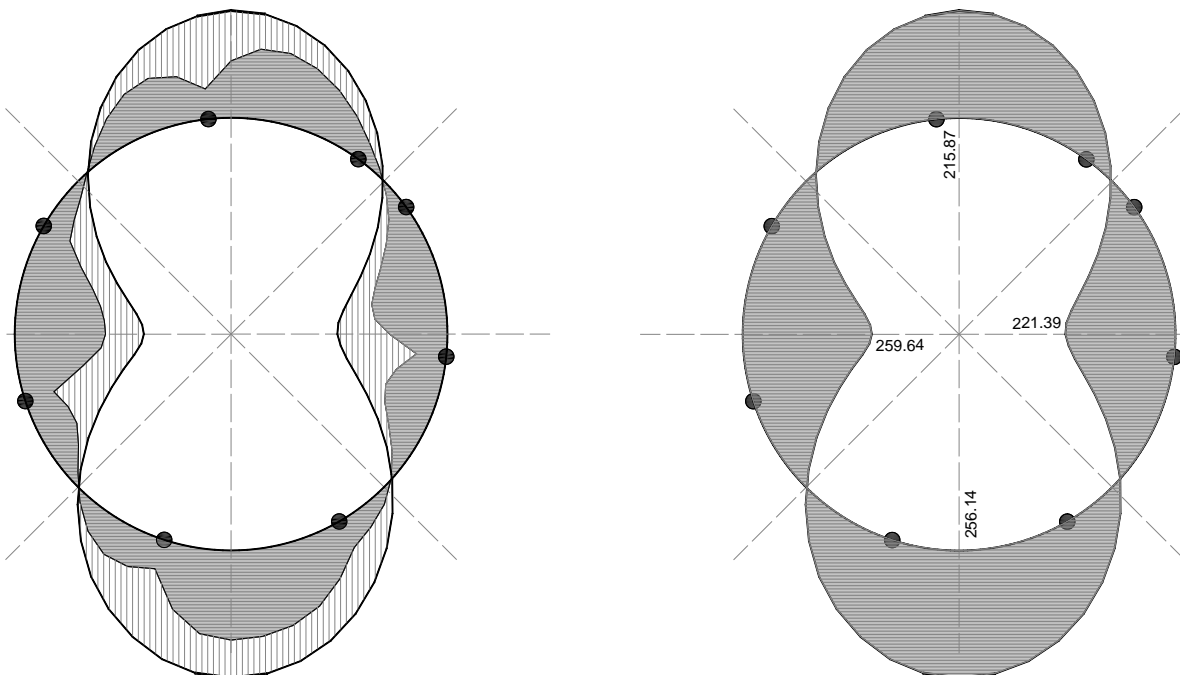


Figura 5.132. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

En los diagramas de momentos flexionantes mostrados en la Figura 5.132 se observa que aunque algunas juntas longitudinales alcanzaron el momento plástico, que para este caso es de aproximadamente 60 kNm, el revestimiento primario tiene la capacidad de seguir soportando momentos flexionantes ya que el revestimiento secundario resiste la flexión que no puede ser tomada por las juntas, como lo muestran los picos de los momentos máximos en la Figura 5.132b.

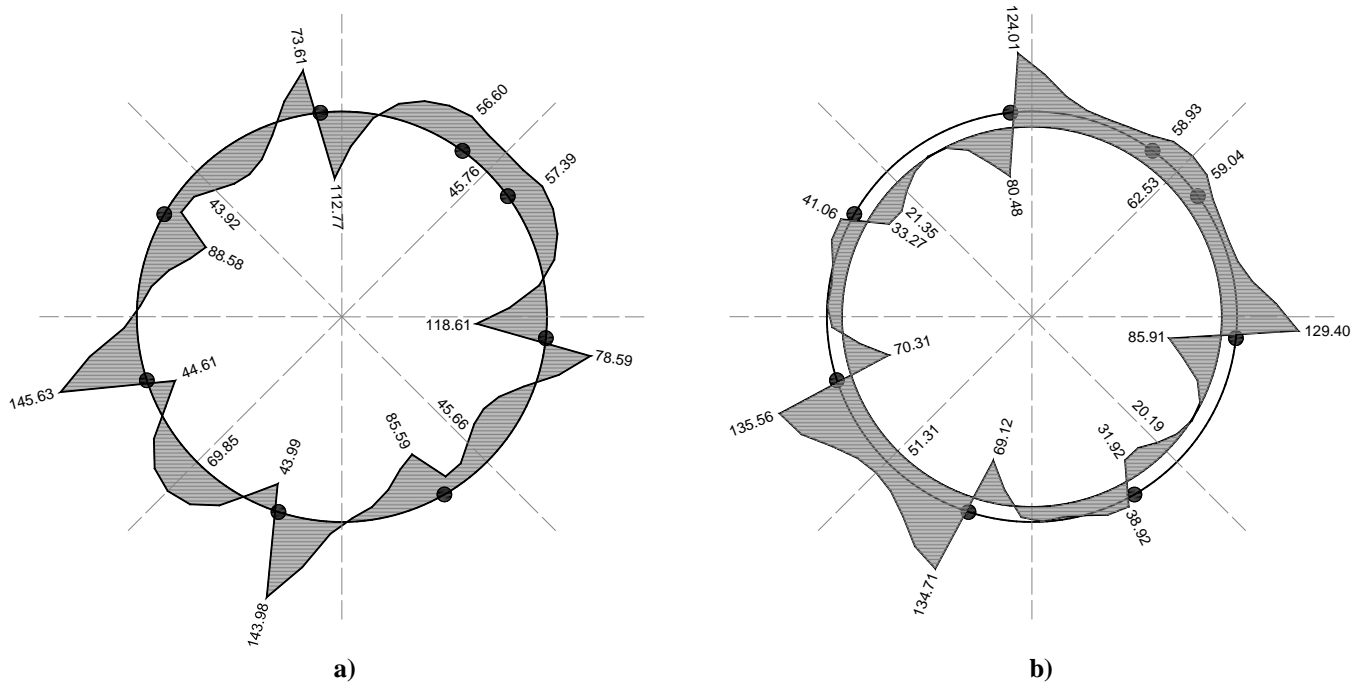


a)

b)

**Figura 5.133. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$).
a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.**

Al sumar los momentos flexionantes de ambos revestimientos, como se muestra en la Figura 5.133, los momentos flexionantes máximos en el anillo de doble revestimiento se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° . La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 150 kNm (la capacidad a flexión del revestimiento secundario varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.131).



Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.135. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. En la Figura 5.134 se muestra la magnitud de los cortantes que soportaron ambos revestimientos por separado. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° .

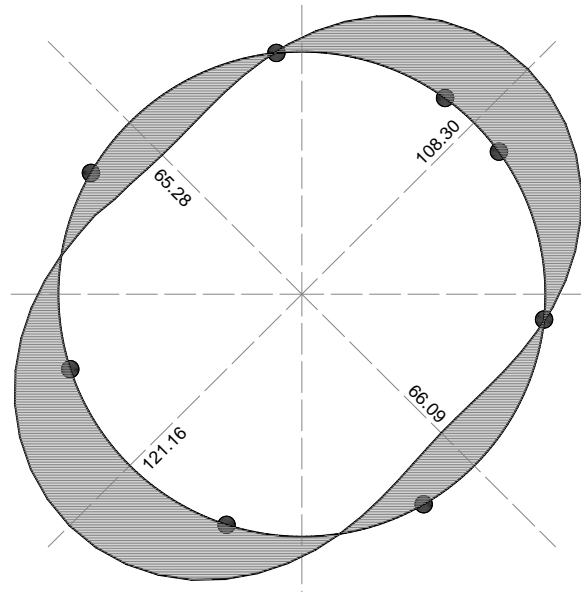


Figura 5.135. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$). Suma de ambos revestimientos.

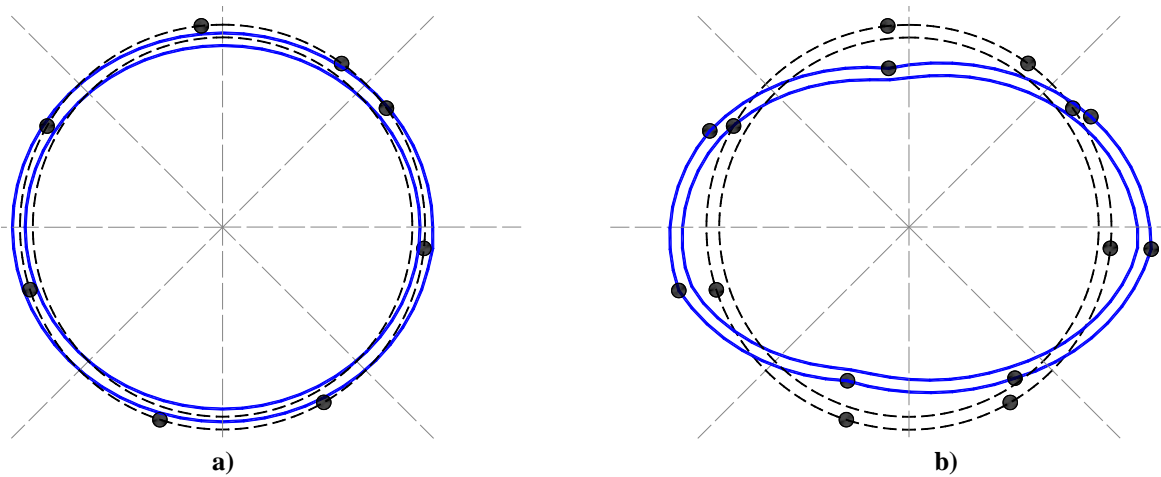


Figura 5.136. Deformadas de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.136a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.32%, y la Figura 5.136b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 1.58%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

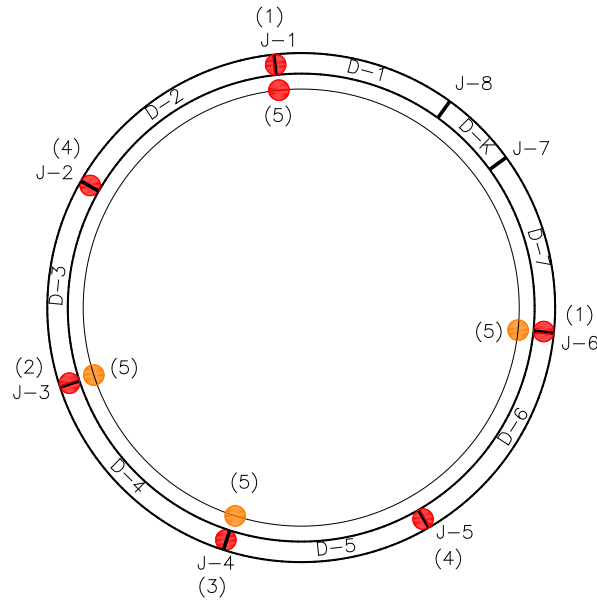


Figura 5.137. Mecanismo de colapso de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$)

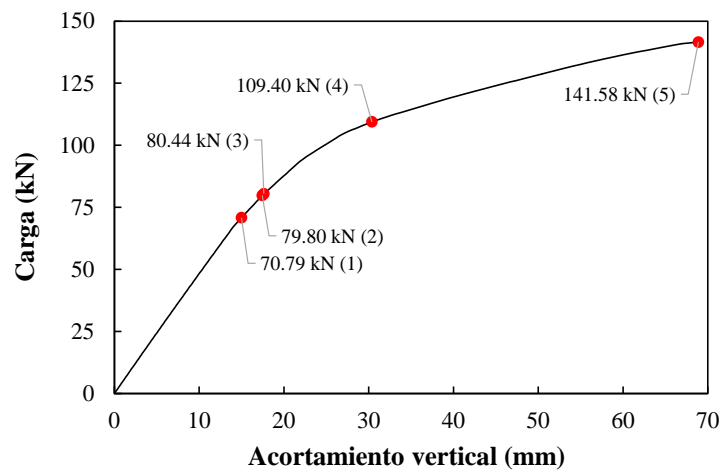


Figura 5.138. Curva de capacidad de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.80$)

Como se muestra en la Figura 5.137, el anillo colapsa al articularse 6 juntas longitudinales y 1 punto en el revestimiento secundario, quedando otros 3 puntos muy cercanos al momento plástico. Los 4 puntos del revestimiento secundario corresponden con 4 juntas longitudinales del revestimiento primario, mismas que son las más cercanas a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.138 y se describe a continuación:

- 1.- Se articulan las juntas J-1 y J-6 a una carga de 70.79 kN y una distorsión diametral de 0.32%.
- 2.- Se articula la junta J-3 a una carga de 79.80 kN.

- 3.- Se articula la junta J-4 a una carga de 80.44 kN.
- 4.- Se articulan las juntas J-2 y J-5 a una carga de 109.40 kN.
- 5.- Se articula revestimiento secundario a la altura de la junta J-1 y quedan puntos muy cercanos a alcanzar su plastificación a la altura de las juntas J-3 y J-4 y J-6 a una carga de 141.58 kN y una distorsión diametral de 1.58%.

5.5.11 Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.80$

El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se ignora la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, considerándolo como un anillo continuo, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83c. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 2000 kN en el revestimiento primario, y de 700 kN en el revestimiento secundario. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 26% de la carga axial total. En los hastiales, dicha carga fue aproximadamente 5% y 12% más grande que en la clave y cubeta (en revestimiento primario y secundario, respectivamente), como se muestra en la Figura 5.139.

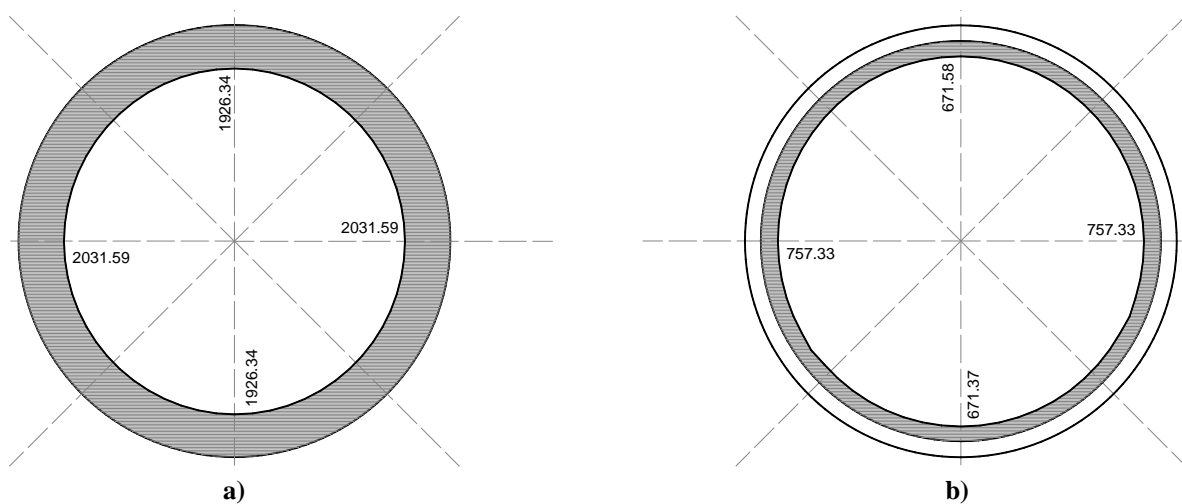


Figura 5.139. Carga axial en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

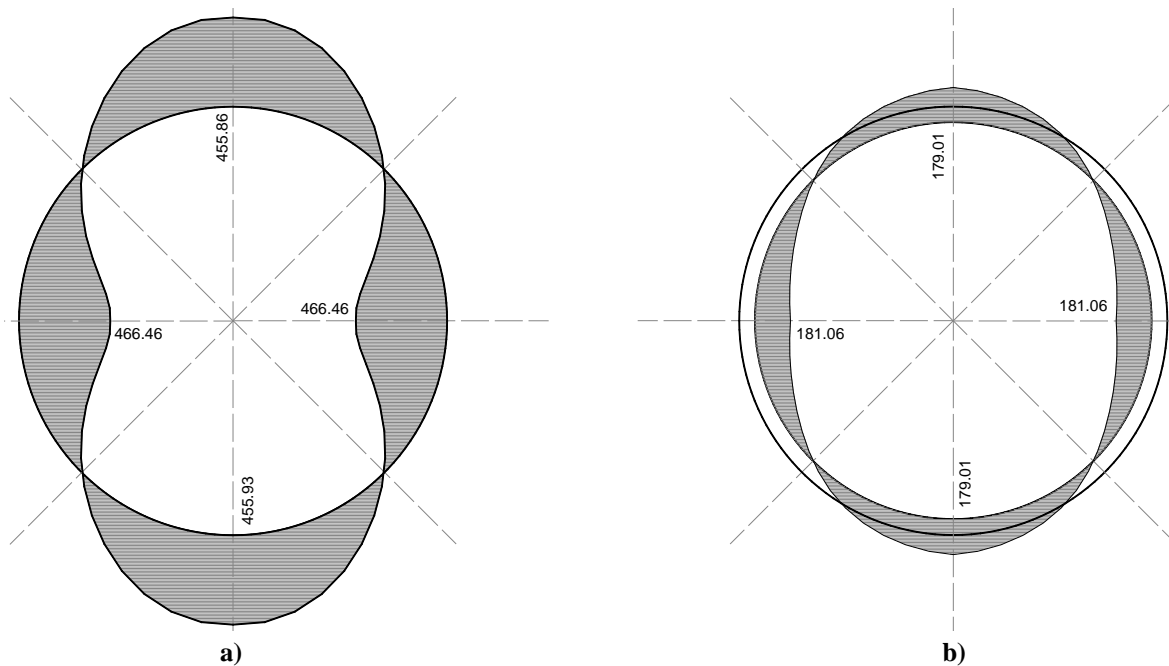


Figura 5.140. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.140. La magnitud de estos momentos es simétrica en el anillo, pues las características del mismo y las cargas son simétricas. Los momentos flexionantes del revestimiento secundario fueron aproximadamente el 28% de los momentos flexionantes totales. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 180 kNm (la capacidad a flexión del anillo varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.139). No obstante, el revestimiento primario también alcanzó el momento plástico en algunos puntos, que para este caso es de 466 kNm. En la Figura 5.141 se observa el diagrama de momentos flexionantes totales y la contribución de ambos revestimientos por separado.

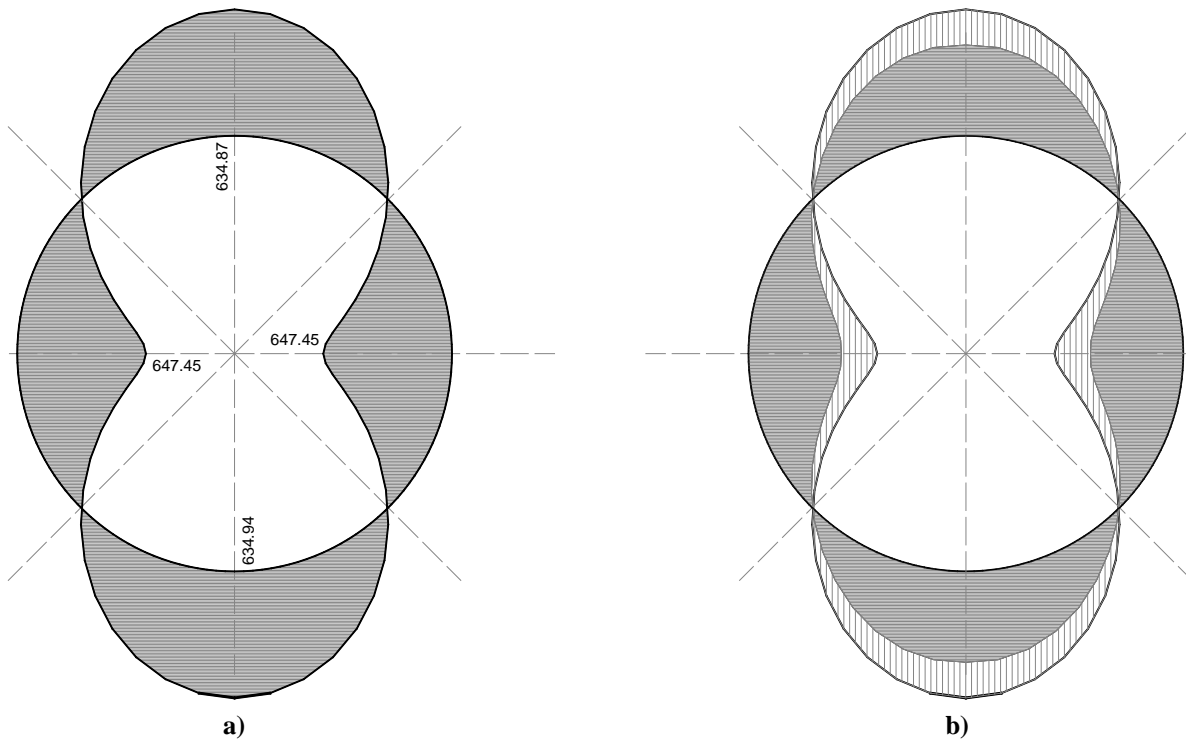


Figura 5.141. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.142. La magnitud de estos cortantes es simétrica en el anillo ya que las características del mismo y las cargas son también simétricas. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° , como se muestra en la Figura 5.143.

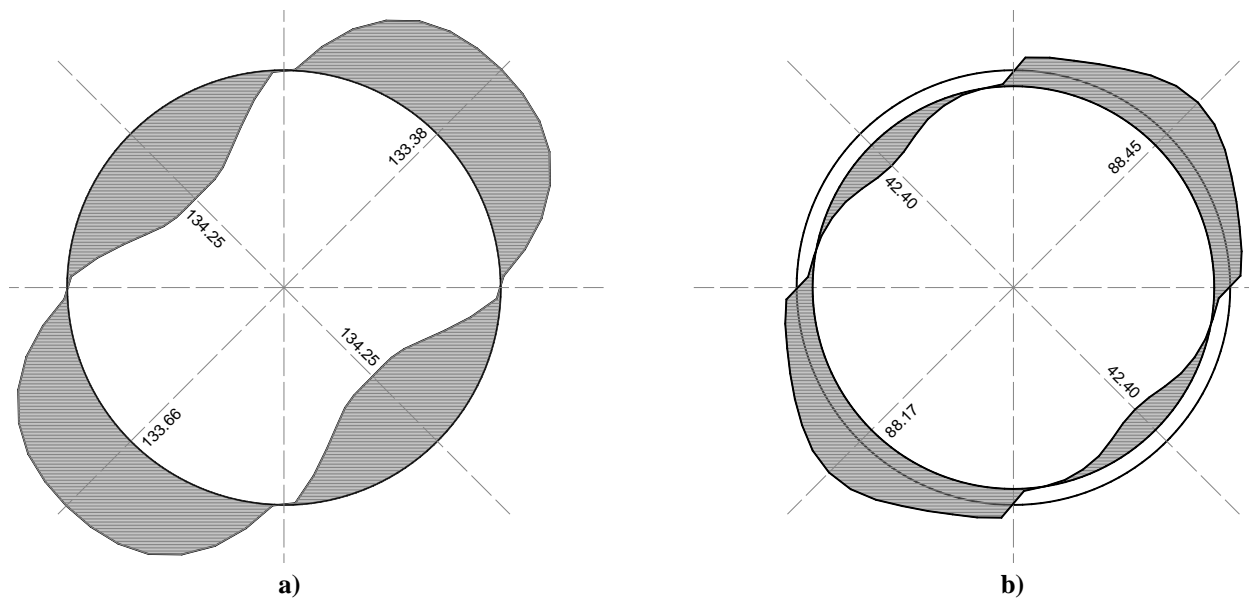


Figura 5.142. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

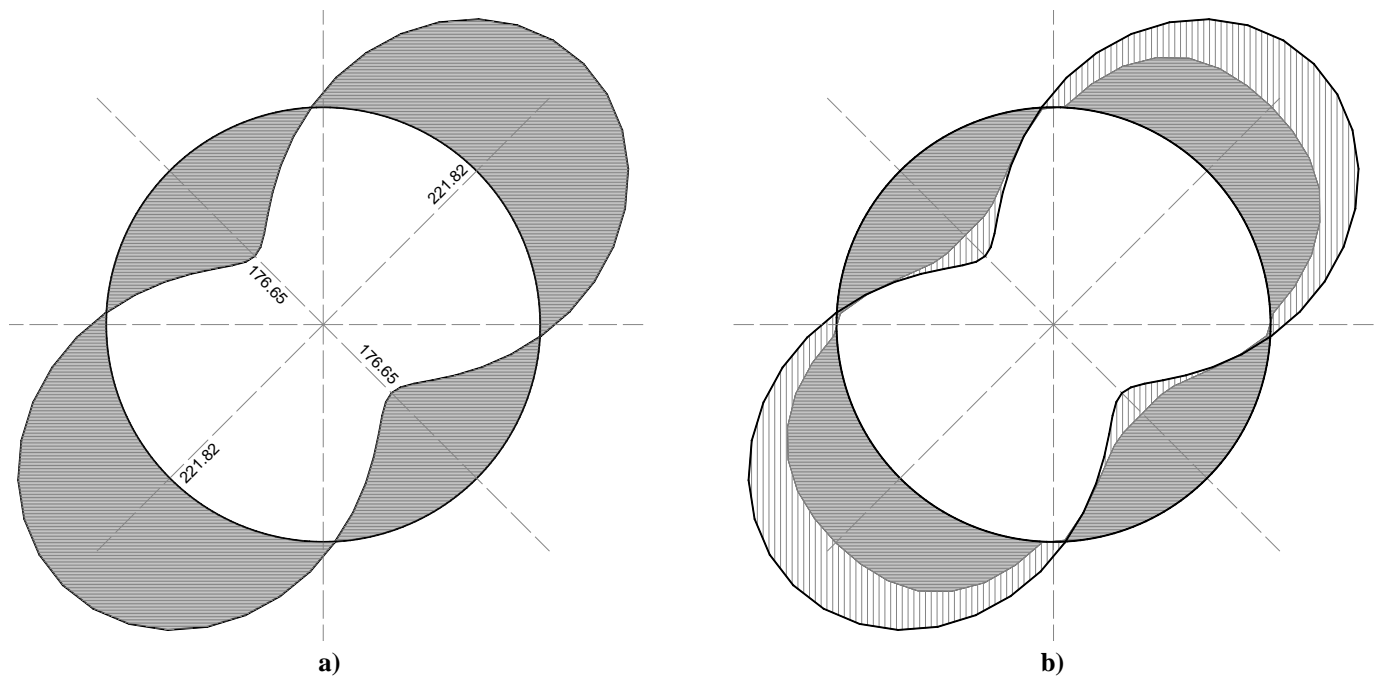


Figura 5.143. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$). a) suma de los cortantes de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

La Figura 5.144a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.78%, y la Figura 5.144b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 3.96%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

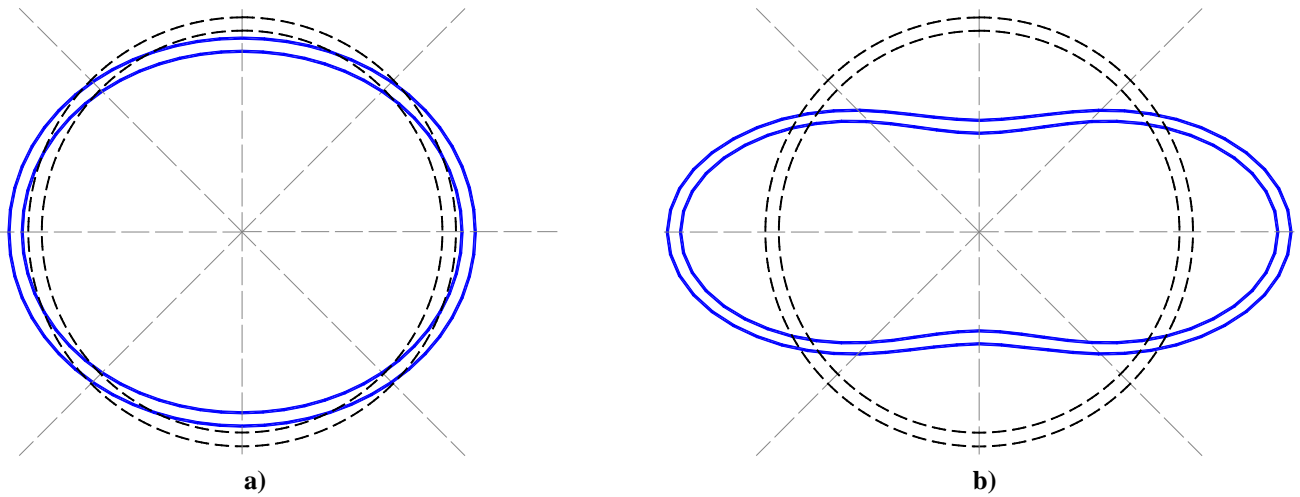


Figura 5.144. Deformadas de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

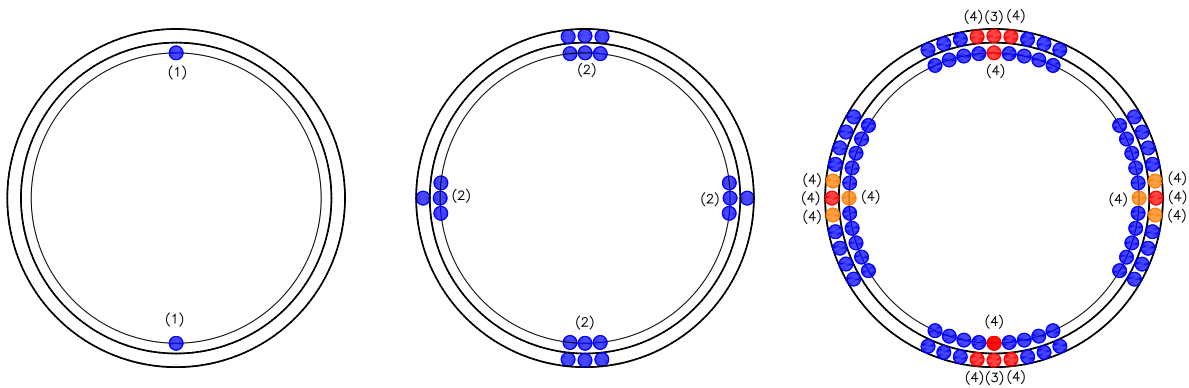


Figura 5.145. Mecanismo de colapso de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$)

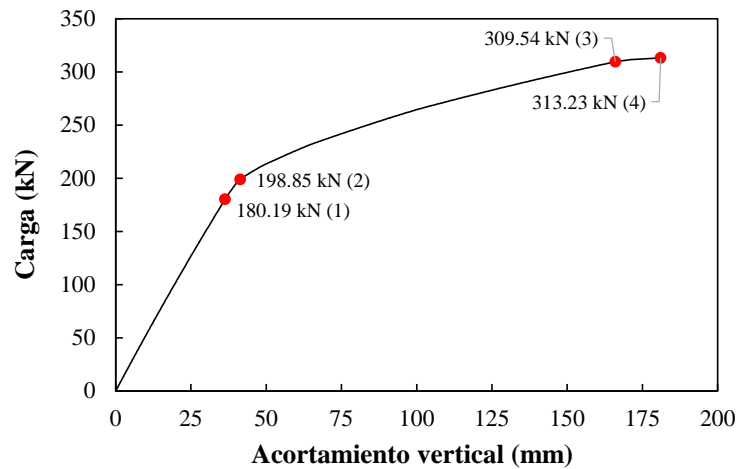


Figura 5.146. Curva de capacidad de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.80$)

Como se muestra en la Figura 5.145, el anillo colapsa al articularse 8 puntos en el revestimiento primario y 2 puntos en el revestimiento secundario en clave y cubeta,

quedando además otros 2 puntos muy cercanos al momento plástico en los hastiales. Dichos puntos están localizados exactamente a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.146 y se describe a continuación:

- 1.- Comienza a agrietarse el revestimiento secundario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 180.19 kN y una distorsión diametral de 0.78%.
- 2.- Se agrieta el revestimiento secundario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 198.85 kN.
- 3.- Se articula el revestimiento primario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 309.54 kN.
- 4.- Se articula el revestimiento secundario en las zonas de clave y cubeta y el revestimiento primario en la zona de hastiales. Además, quedan puntos muy cercanos a la plastificación en la zona de hastiales del revestimiento secundario a una carga de 313.23 kN y una distorsión diametral de 3.96%.

5.5.12 Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.70$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a. El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se toma en cuenta la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83b. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 485 kN en el revestimiento primario, y de 192 kN en el revestimiento secundario, como se muestra en la Figura 5.147. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total.

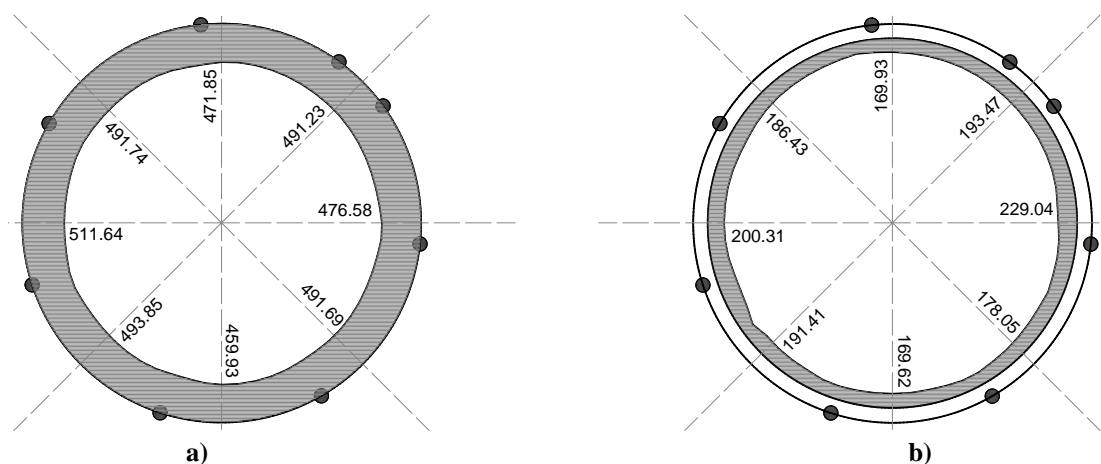


Figura 5.147. Carga axial en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

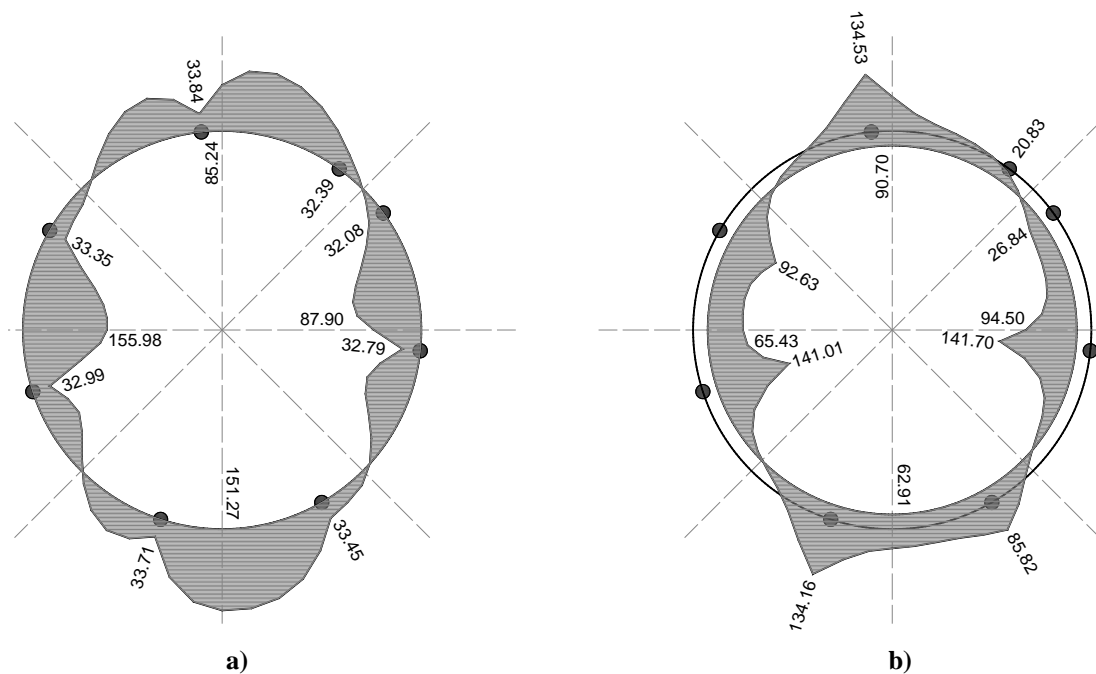
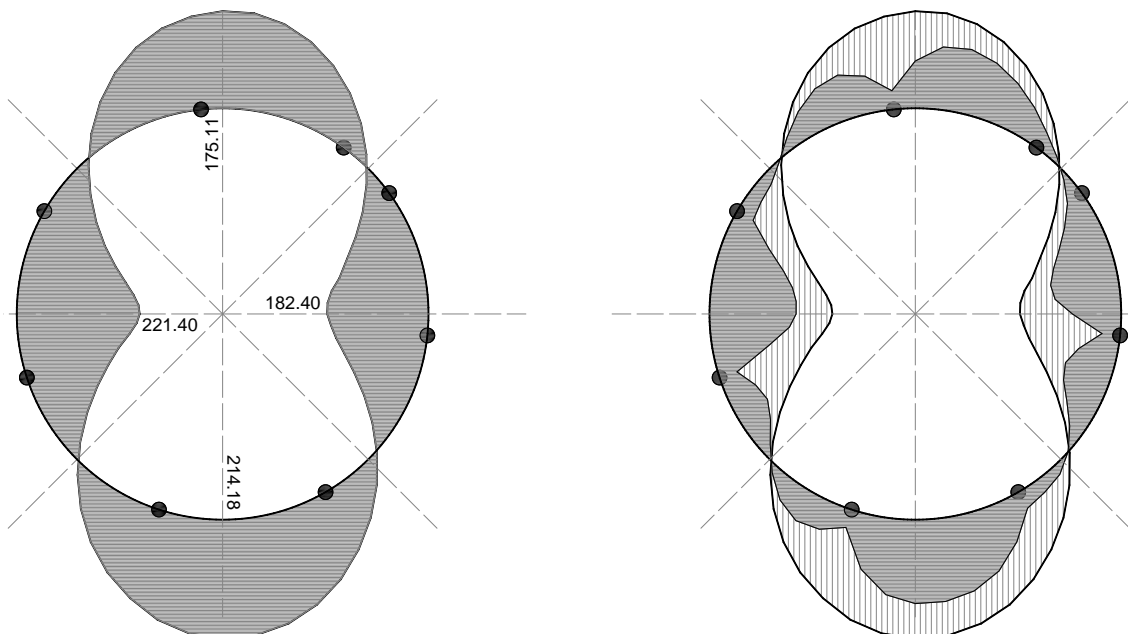


Figura 5.148. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$).
a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

En los diagramas de momentos flexionantes mostrados en la Figura 5.148 se observa que aunque algunas juntas longitudinales alcanzaron el momento plástico, que para este caso es de aproximadamente 32 kNm, el revestimiento primario tiene la capacidad de seguir soportando momentos flexionantes ya que el revestimiento secundario resiste la flexión que no puede ser tomada por las juntas, como lo muestran los picos de los momentos máximos en la Figura 5.148b.



a)

b)

Figura 5.149. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Al sumar los momentos flexionantes de ambos revestimientos, como se muestra en la Figura 5.149, los momentos flexionantes máximos en el anillo de doble revestimiento se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° . La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 135 kNm (la capacidad a flexión del revestimiento secundario varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.147).

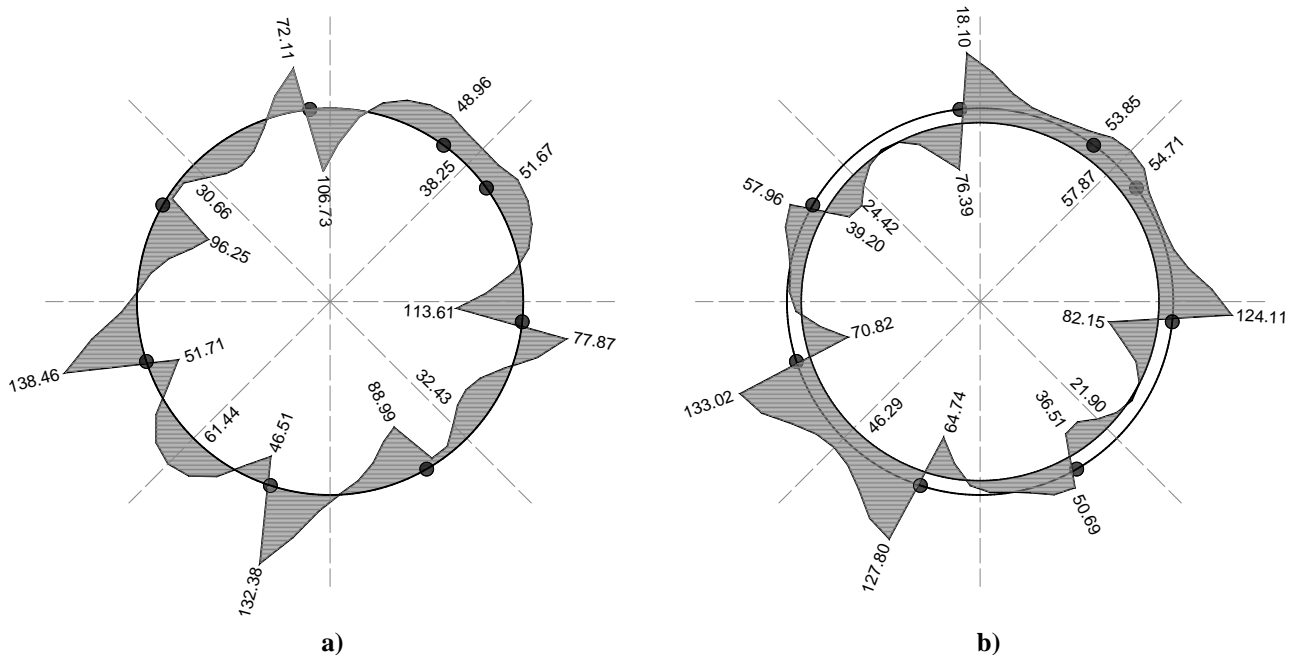


Figura 5.150. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.151. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. En la Figura 5.150 se muestra la magnitud de los cortantes que soportaron ambos revestimientos por separado. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° .

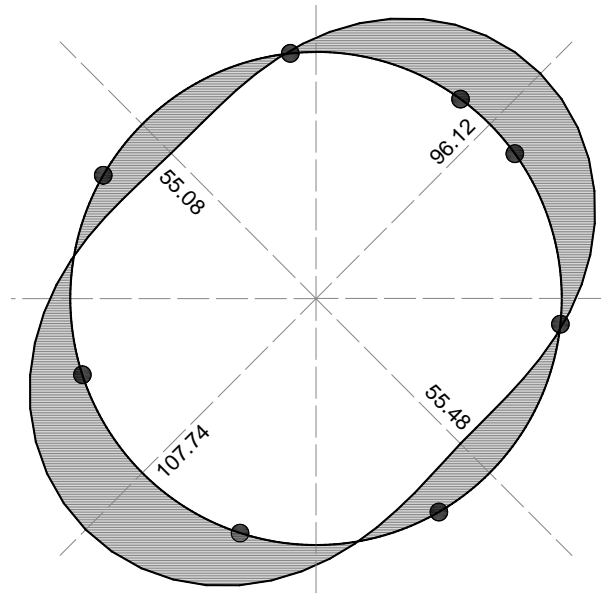


Figura 5.151. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$). Suma de ambos revestimientos.

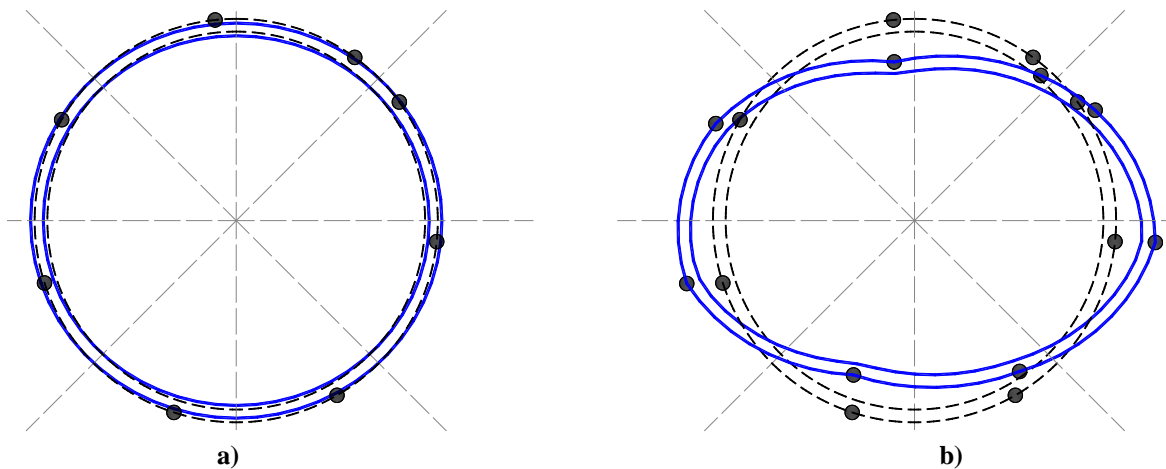


Figura 5.152. Deformadas de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.152a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.17%, y la Figura 5.152b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 1.53%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

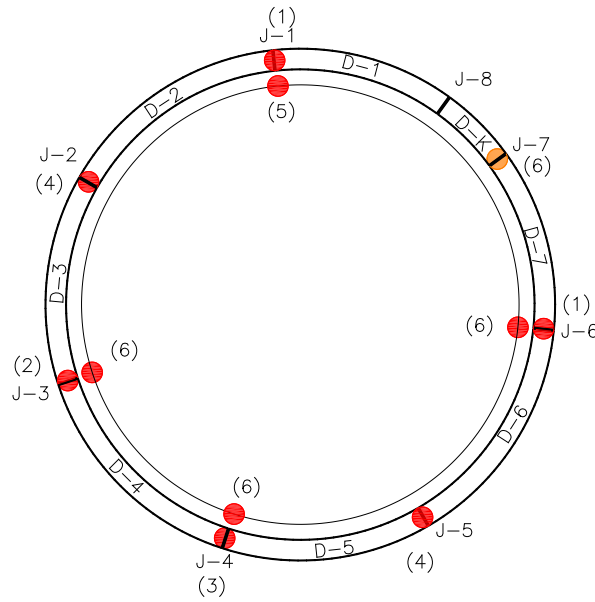


Figura 5.153. Mecanismo de colapso de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$)

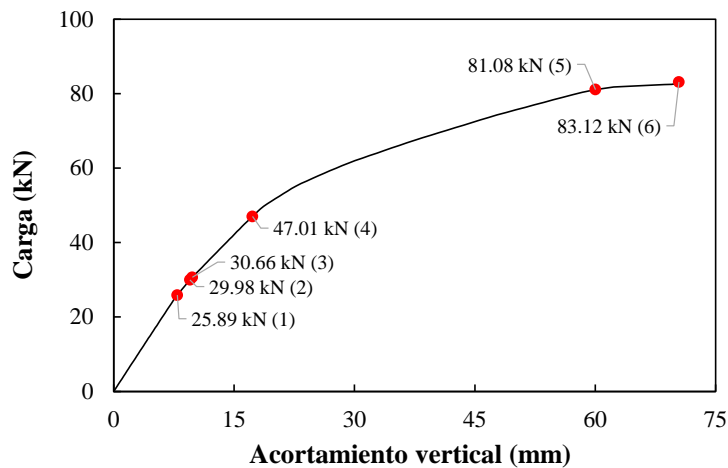


Figura 5.154. Curva de capacidad de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.70$)

Como se muestra en la Figura 5.153, el anillo colapsa al articularse 6 juntas longitudinales y 4 puntos en el revestimiento secundario. Los 4 puntos del revestimiento secundario corresponden con 4 juntas longitudinales del revestimiento primario, mismas que son las más cercanas a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.154 y se describe a continuación:

- 1.- Se articulan las juntas J-1 y J-6 a una carga de 25.89 kN y una distorsión diametral de 0.17%.
- 2.- Se articula la junta J-3 a una carga de 29.98 kN.
- 3.- Se articula la junta J-4 a una carga de 30.66 kN.

4.- Se articulan las juntas J-2 y J-5 a una carga de 47.01 kN.

5.- Se articula el revestimiento secundario a la altura de la junta J-1 a una carga de 81.08 kN.

6.- Se articula el revestimiento secundario a la altura de las juntas J-3 y J-4 y J-6, además, la junta J-7 queda muy cercana al momento plástico, a una carga de 83.12 kN y una distorsión diametral de 1.53%.

5.5.13 Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.70$

El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se ignora la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, considerándolo como un anillo continuo, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83b. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 1160 kN en el revestimiento primario, y de 400 kN en el revestimiento secundario. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total. En los hastiales, dicha carga fue aproximadamente 8% y 24% más grande que en la clave y cubeta (en revestimiento primario y secundario, respectivamente), como se muestra en la Figura 5.155.

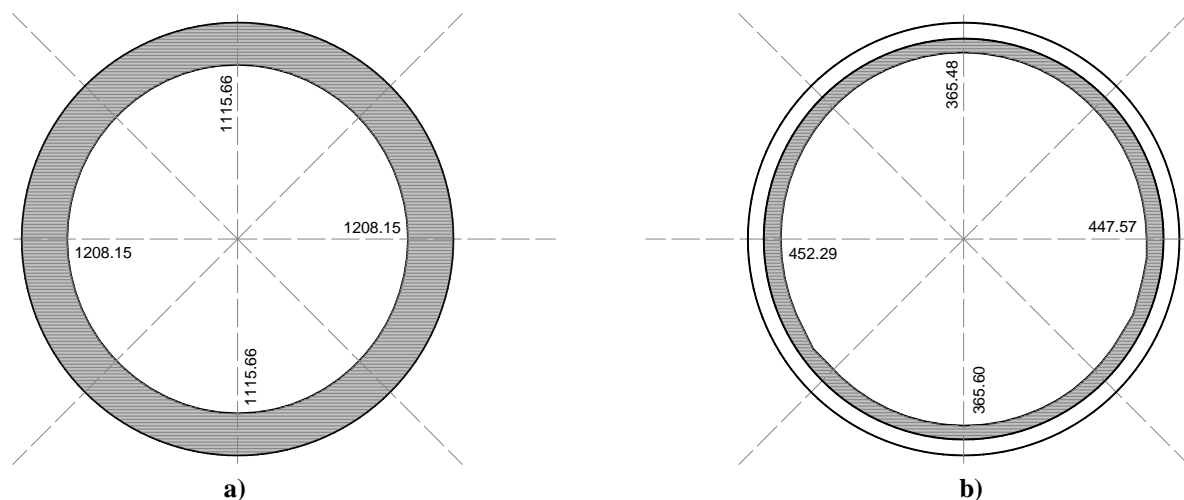


Figura 5.155. Carga axial en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

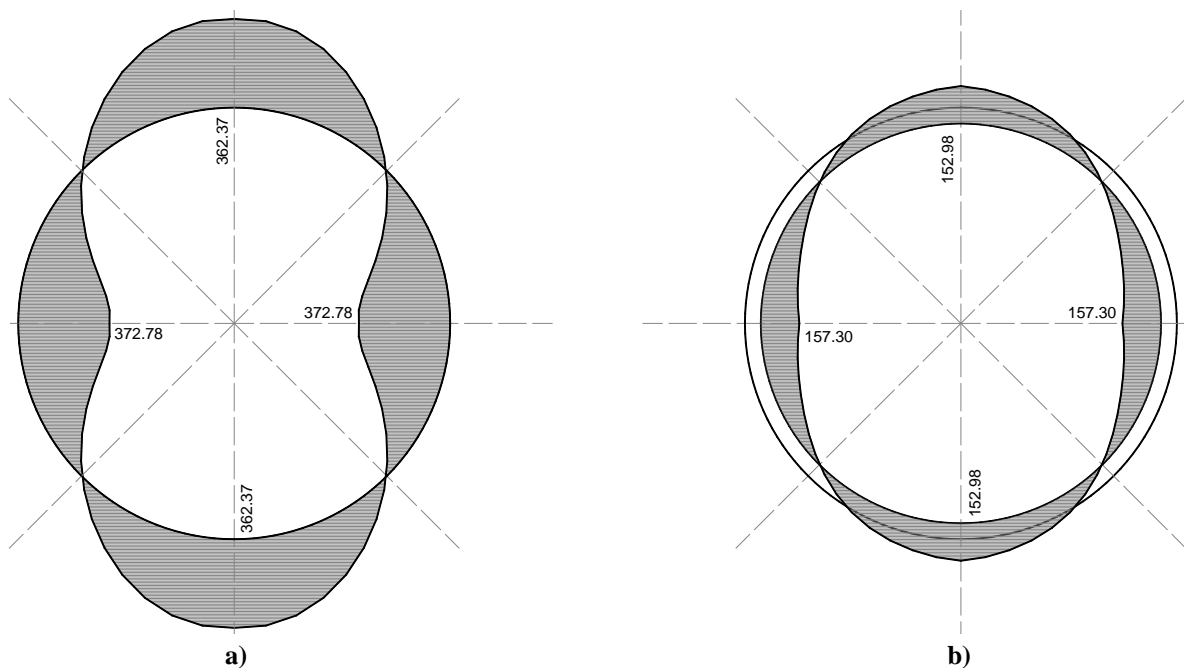


Figura 5.156. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.156. La magnitud de estos momentos es simétrica en el anillo, pues las características del mismo y las cargas son simétricas. Los momentos flexionantes del revestimiento secundario fueron aproximadamente el 30% de los momentos flexionantes totales. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 157 kNm (la capacidad a flexión del anillo varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.155). No obstante, el revestimiento primario también alcanzó el momento plástico en algunos puntos, que para este caso es de 545 kNm. En la Figura 5.157 se observa el diagrama de momentos flexionantes totales y la contribución de ambos revestimientos por separado.

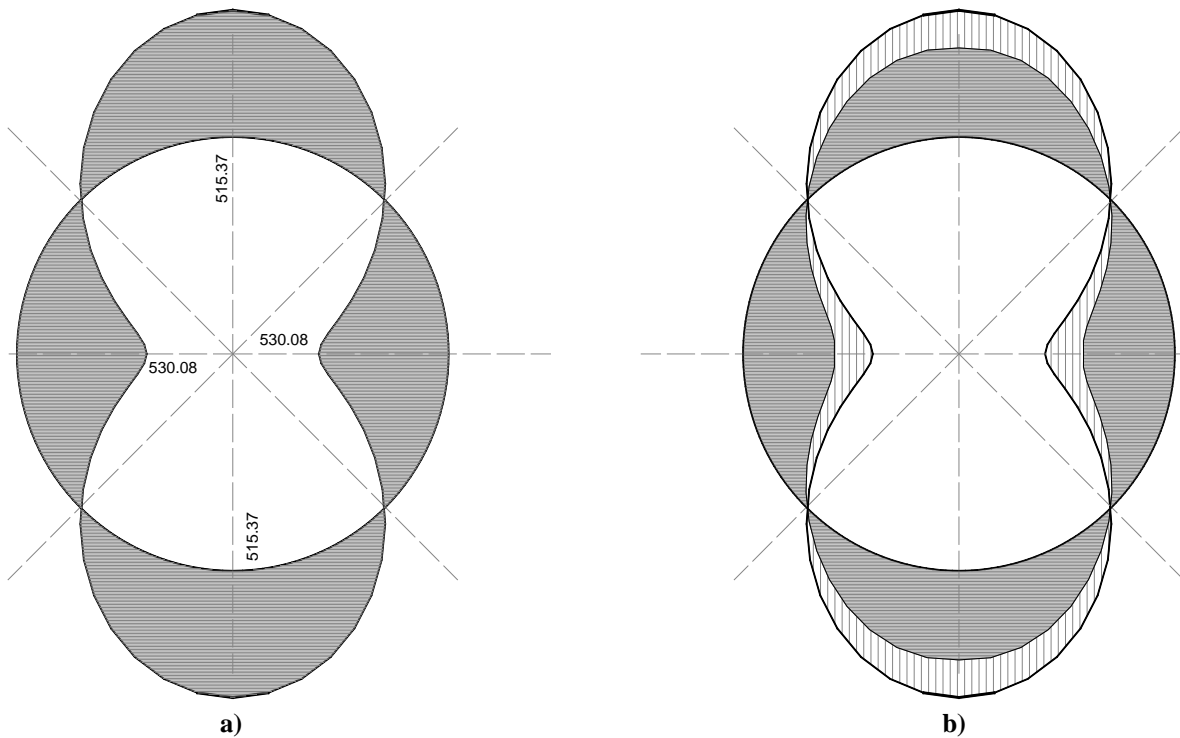


Figura 5.157. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.158. La magnitud de estos cortantes es simétrica en el anillo ya que las características del mismo y las cargas son también simétricas. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° , como se muestra en la Figura 5.159.

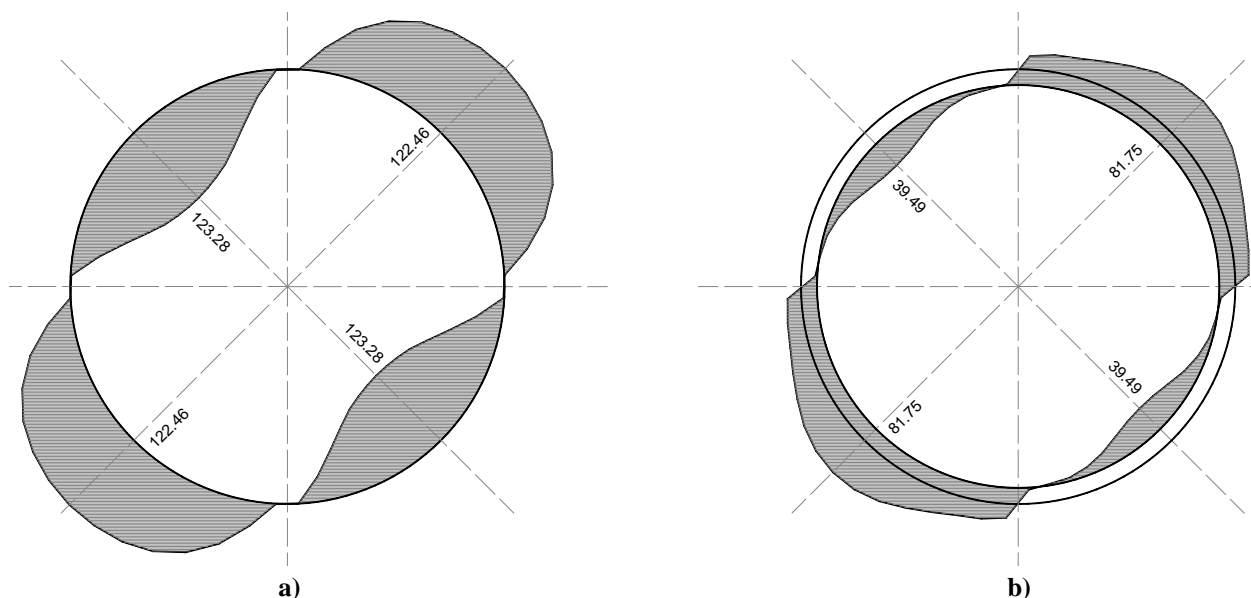


Figura 5.158. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

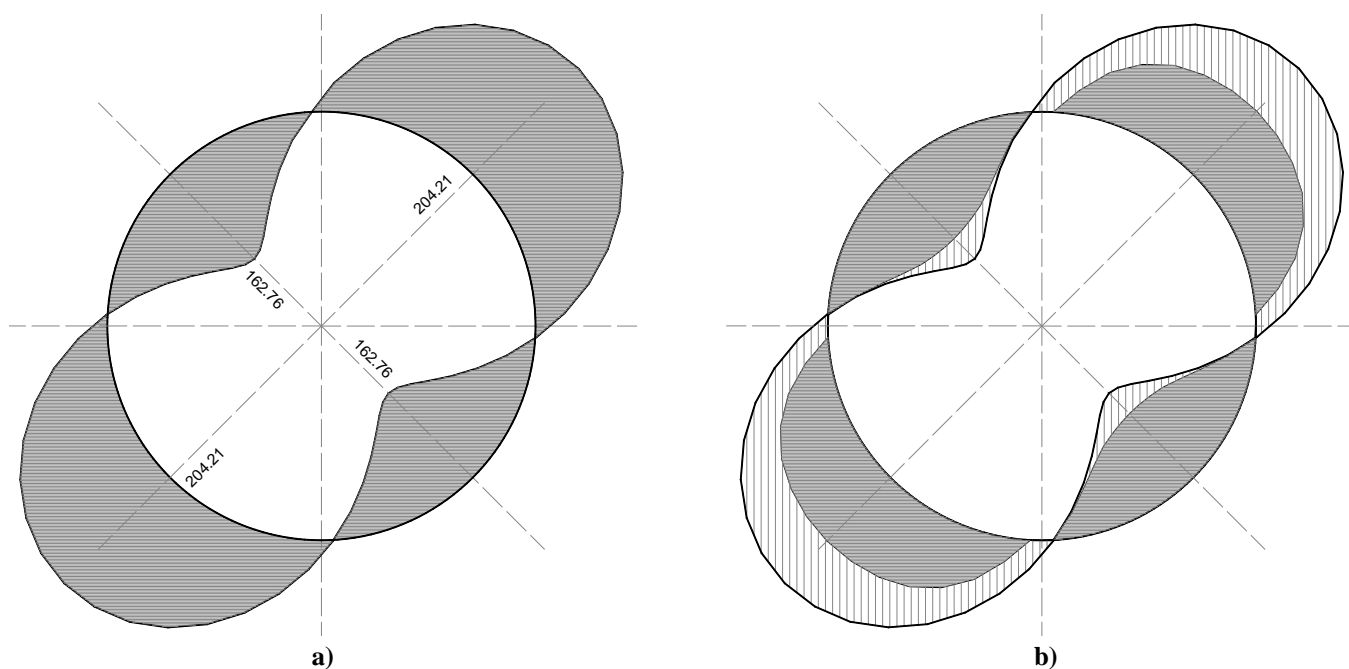


Figura 5.159. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$). a) suma de los cortantes de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

La Figura 5.160a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.70%, y la Figura 5.160b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 3.61%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

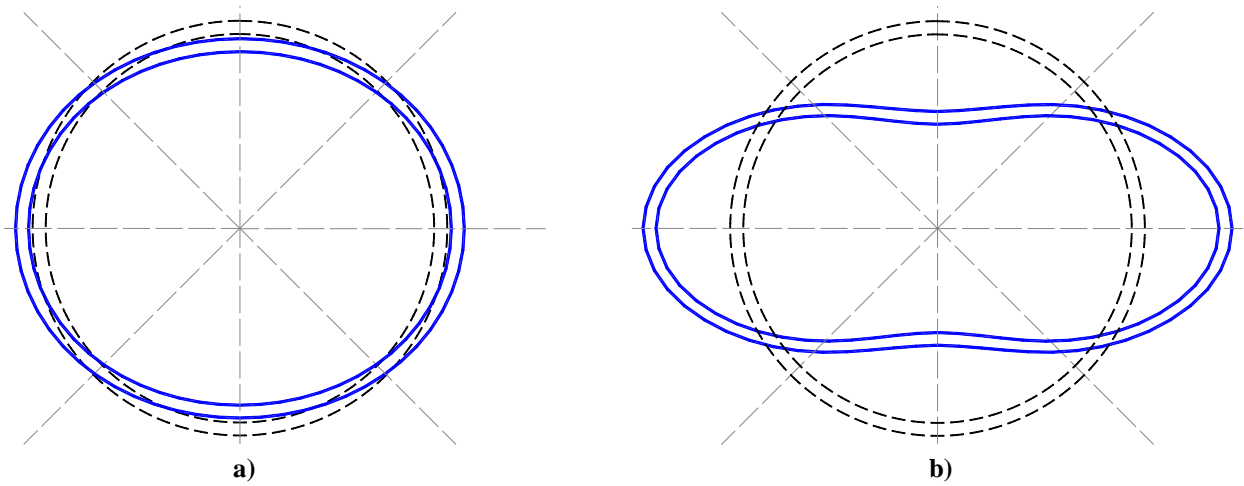


Figura 5.160. Deformadas de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

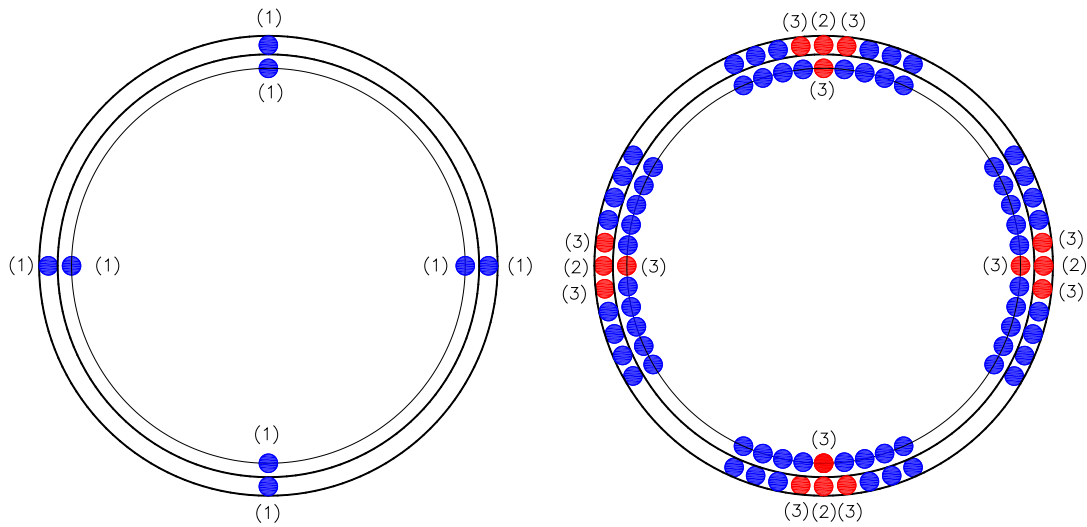


Figura 5.161. Mecanismo de colapso de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$)

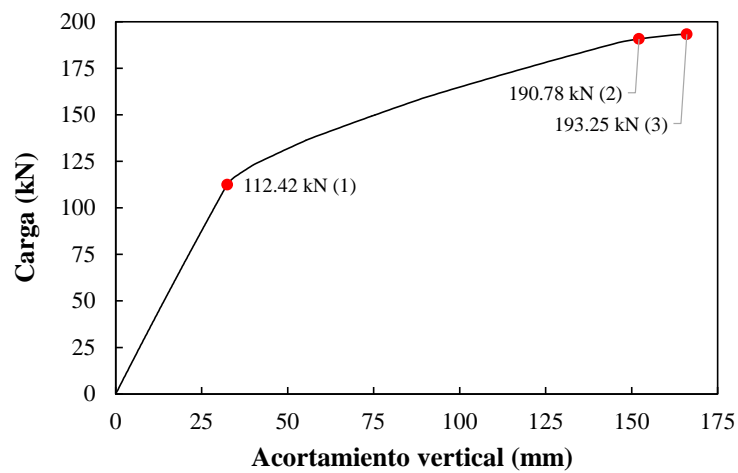


Figura 5.162. Curva de capacidad de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.70$)

Como se muestra en la Figura 5.161, el anillo colapsa al articularse 12 puntos en el revestimiento primario y 4 puntos en el revestimiento secundario. Dichos puntos están localizados exactamente a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.162 y se describe a continuación:

- 1.- Comienza a agrietarse el revestimiento primario y secundario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 112.42 kN y una distorsión diametral de 0.70%.
- 2.- Se articula el revestimiento primario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 190.78 kN.
- 3.- Se articulan más puntos en el revestimiento primario en las zonas de clave, cubeta y hastiales y, además, se articula el revestimiento secundario en las zonas de clave y cubeta a una carga de 193.25 kN y una distorsión diametral de 3.61%.

5.5.14 Anillo aislado con revestimiento (modelo con juntas) $K=0.60$

La posición de las juntas en este modelo es la mostrada en la Figura 5.82a. El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se toma en cuenta la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83a. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 316 kN en el revestimiento primario, y de 128 kN en el revestimiento secundario, como se muestra en la Figura 5.163. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total.

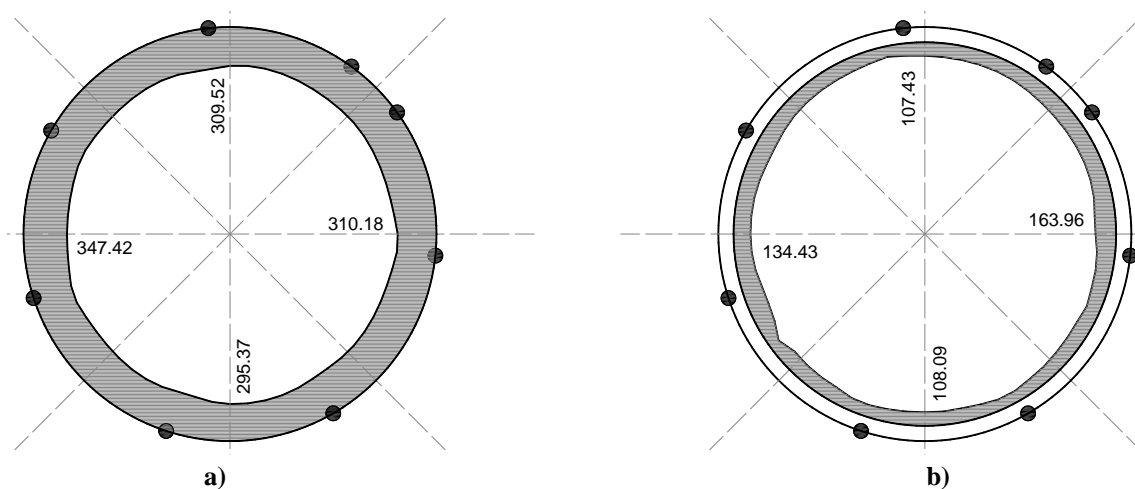


Figura 5.163. Carga axial en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

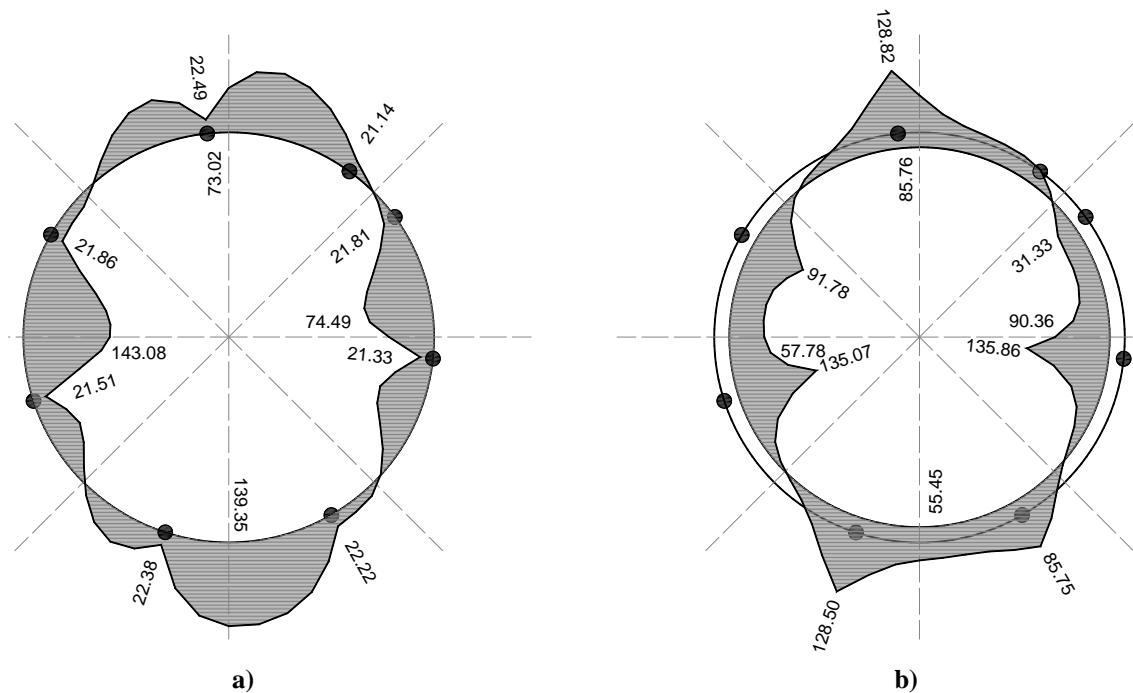
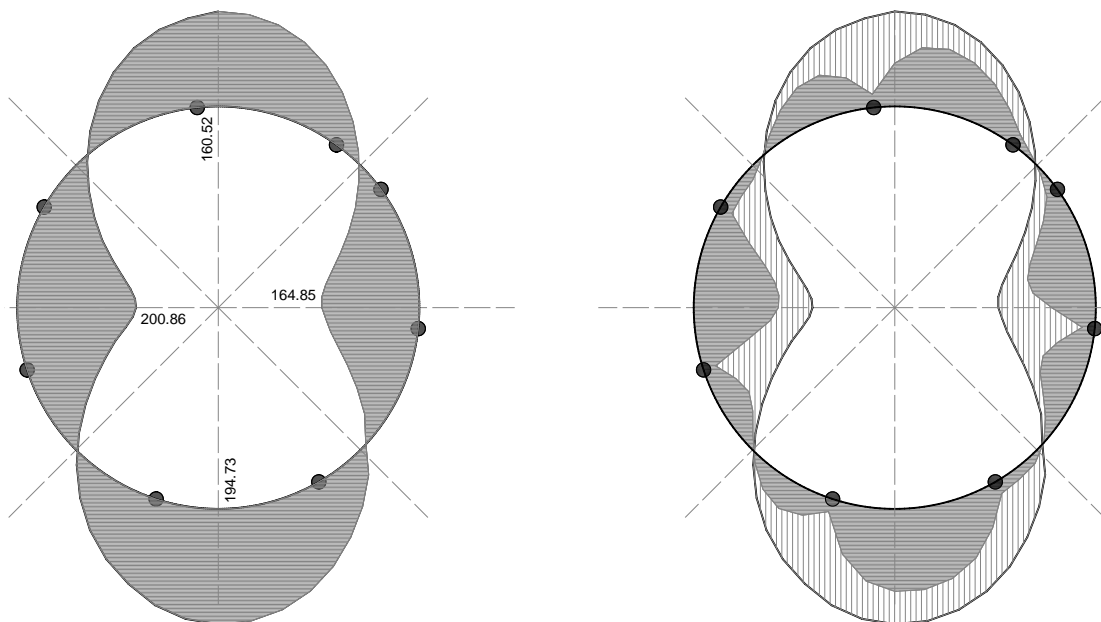


Figura 5.164. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

En los diagramas de momentos flexionantes mostrados en la Figura 5.164 se observa que aunque algunas juntas longitudinales alcanzaron el momento plástico, que para este caso es de aproximadamente 22 kNm, el revestimiento primario tiene la capacidad de seguir soportando momentos flexionantes ya que el revestimiento secundario resiste la flexión que no puede ser tomada por las juntas, como lo muestran los picos de los momentos máximos en la Figura 5.164b.



a)

b)

Figura 5.165. Momentos flexionantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$).
a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Al sumar los momentos flexionantes de ambos revestimientos, como se muestra en la Figura 5.165, los momentos flexionantes máximos en el anillo de doble revestimiento se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° . La razón por la que la magnitud de estos momentos no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 130 kNm (la capacidad a flexión del revestimiento secundario varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.163).

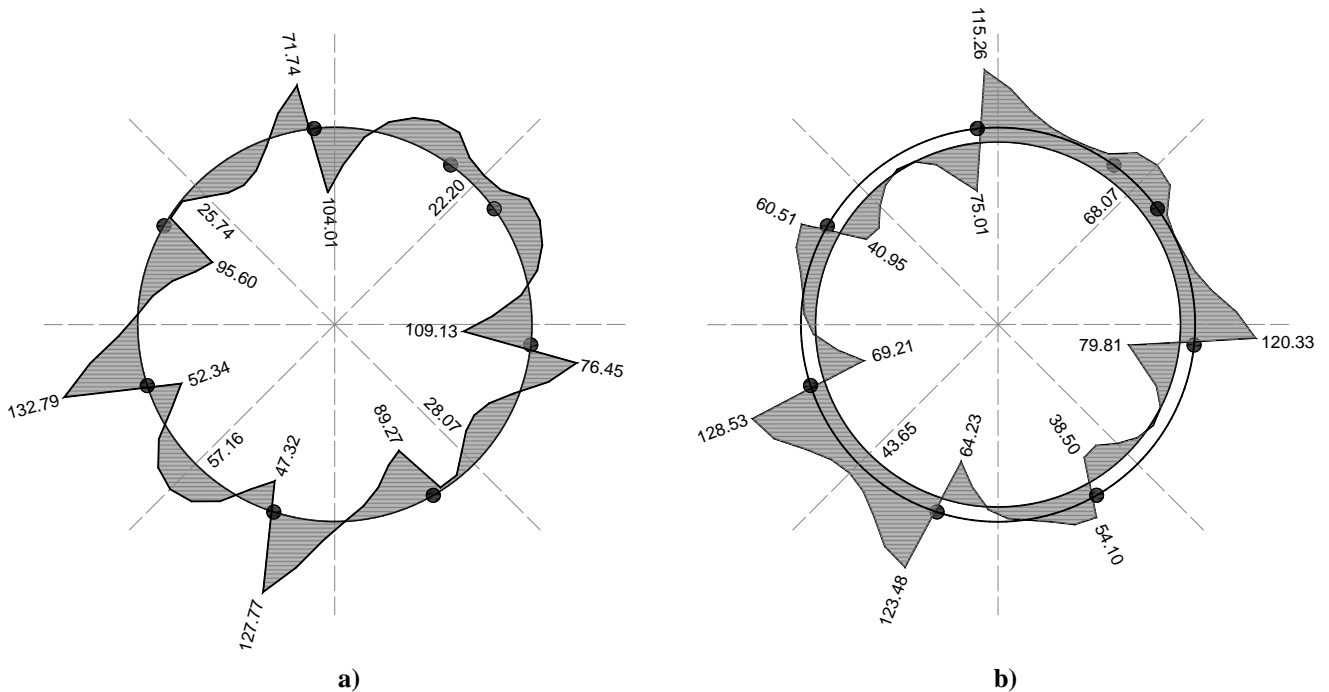


Figura 5.166. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.167. La razón por la que la magnitud de estos cortantes no es simétrica en el anillo es por la presencia y posición de las juntas. En la Figura 5.166 se muestra la magnitud de los cortantes que soportaron ambos revestimientos por separado. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° .

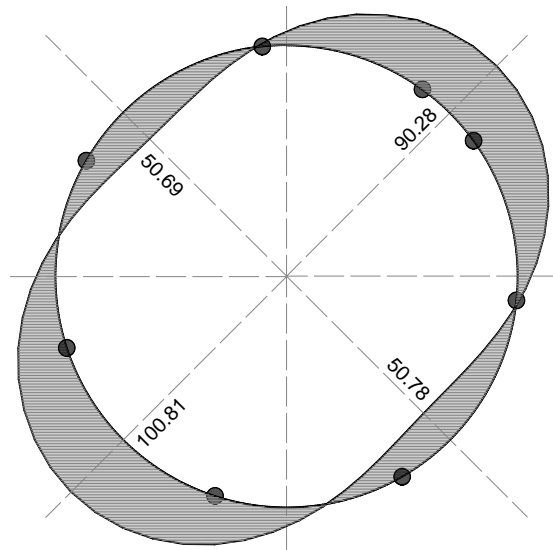


Figura 5.167. Cortantes en anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$). Suma de ambos revestimientos.

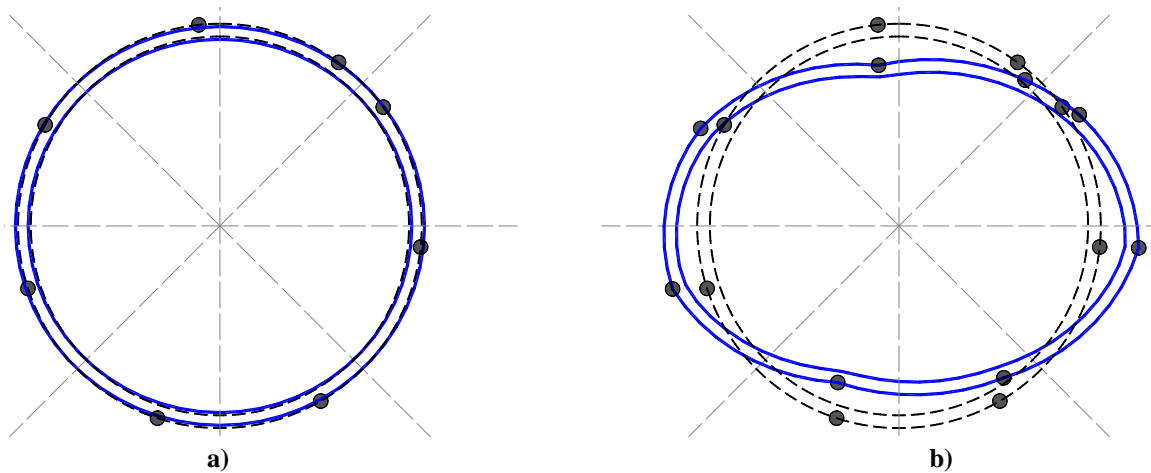


Figura 5.168. Deformadas de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

La Figura 5.168a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.12%, y la Figura 5.168b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 1.46%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

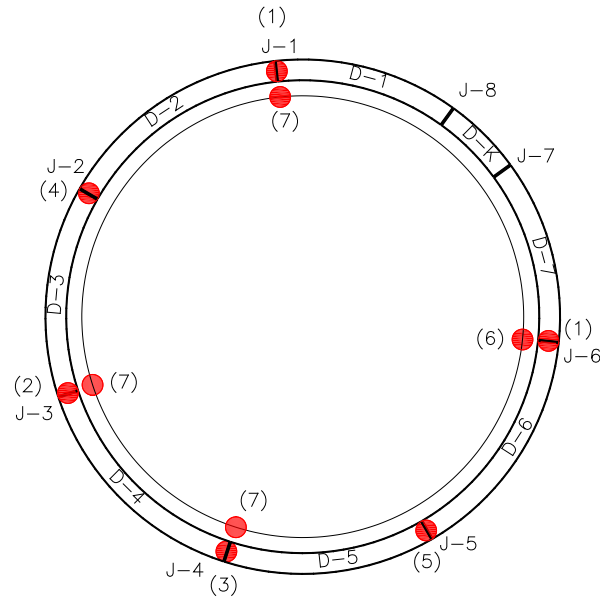


Figura 5.169. Mecanismo de colapso de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$)

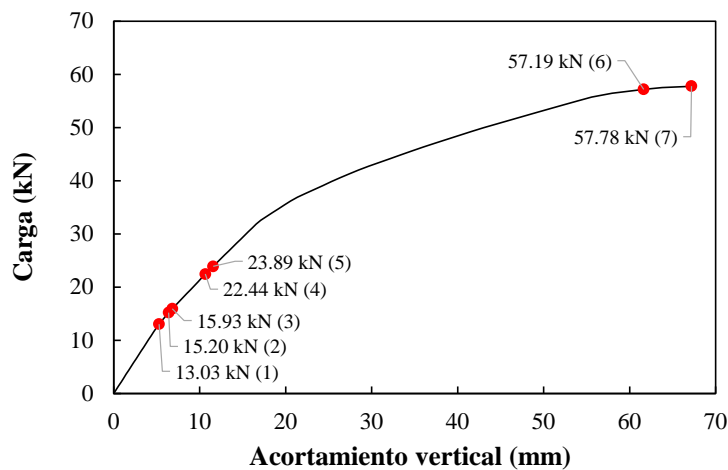


Figura 5.170. Curva de capacidad de anillo aislado con juntas y revestimiento ($K=0.60$)

Como se muestra en la Figura 5.169, el anillo colapsa al articularse 6 juntas longitudinales y 4 puntos en el revestimiento secundario. Los 4 puntos del revestimiento secundario corresponden con 4 juntas longitudinales del revestimiento primario, mismas que son las más cercanas a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.170 y se describe a continuación:

- 1.- Se articulan las juntas J-1 y J-6 a una carga de 13.03 kN y una distorsión diametral de 0.12%.
- 2.- Se articula la junta J-3 a una carga de 15.20 kN.
- 3.- Se articula la junta J-4 a una carga de 15.93 kN.

- 4.- Se articula la juntas J-2 a una carga de 22.44 kN.
- 5.- Se articulan la junta J-5 a una carga de 23.89 kN.
- 6.- Se articula el revestimiento secundario a la altura de la junta J-6 a una carga de 57.19 kN.
- 7.- Se articula el revestimiento secundario a la altura de las juntas J-1, J-3 y J-4; además, la junta J-7 queda muy cercana al momento plástico, a una carga de 57.78 kN y una distorsión diametral de 1.46%.

5.5.15 Anillo aislado con revestimiento (modelo sin juntas) $K=0.60$

El propósito de este modelo es determinar el comportamiento de un anillo de doble revestimiento cuando se ignora la presencia de las juntas longitudinales en el revestimiento primario, considerándolo como un anillo continuo, y la influencia que tiene la relación de cargas K_0 en el mecanismo de colapso del túnel. Se utilizó la relación de cargas mostrada en la Figura 5.83a. La carga axial que se desarrolló en el modelo al suceder el colapso fue ligeramente variable y de un valor promedio de 780 kN en el revestimiento primario, y de 260 kN en el revestimiento secundario. La carga axial del revestimiento secundario fue aproximadamente el 27% de la carga axial total. En los hastiales, dicha carga fue aproximadamente 11% y 39% más grande que en la clave y cubeta (en revestimiento primario y secundario, respectivamente), como se muestra en la Figura 5.171.

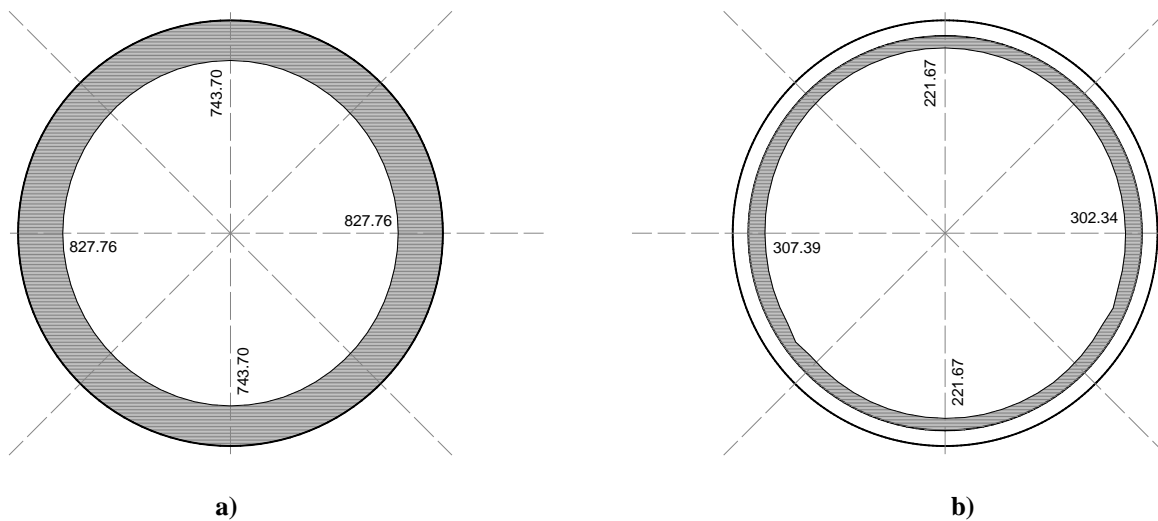


Figura 5.171. Carga axial en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

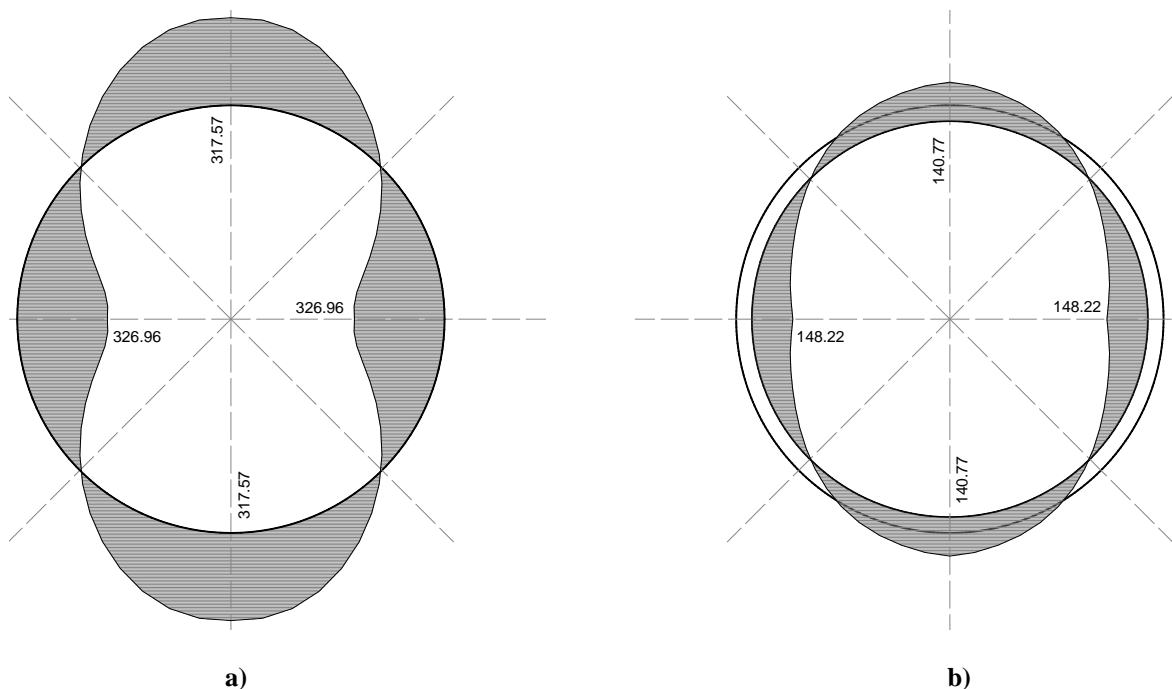


Figura 5.172. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

Los momentos flexionantes máximos se registraron en las zonas de clave y cubeta (momentos positivos) y hastiales (momentos negativos), aproximadamente a 0° , 90° , 180° y 270° , como se muestra en la Figura 5.172. La magnitud de estos momentos es simétrica en el anillo, pues las características del mismo y las cargas son simétricas. Los momentos flexionantes del revestimiento secundario fueron aproximadamente el 31% de los momentos flexionantes totales. Los momentos máximos quedaron limitados por la capacidad del revestimiento secundario que, para este caso, es de aproximadamente 148 kNm (la capacidad a flexión del anillo varía ligeramente en toda la periferia debido a que la carga axial que actúa en este también varía según se observa en la Figura 5.171). No obstante, el revestimiento primario también alcanzó el momento plástico en algunos puntos, que para este caso es de 326 kNm. En la Figura 5.173 se observa el diagrama de momentos flexionantes totales y la contribución de ambos revestimientos por separado.

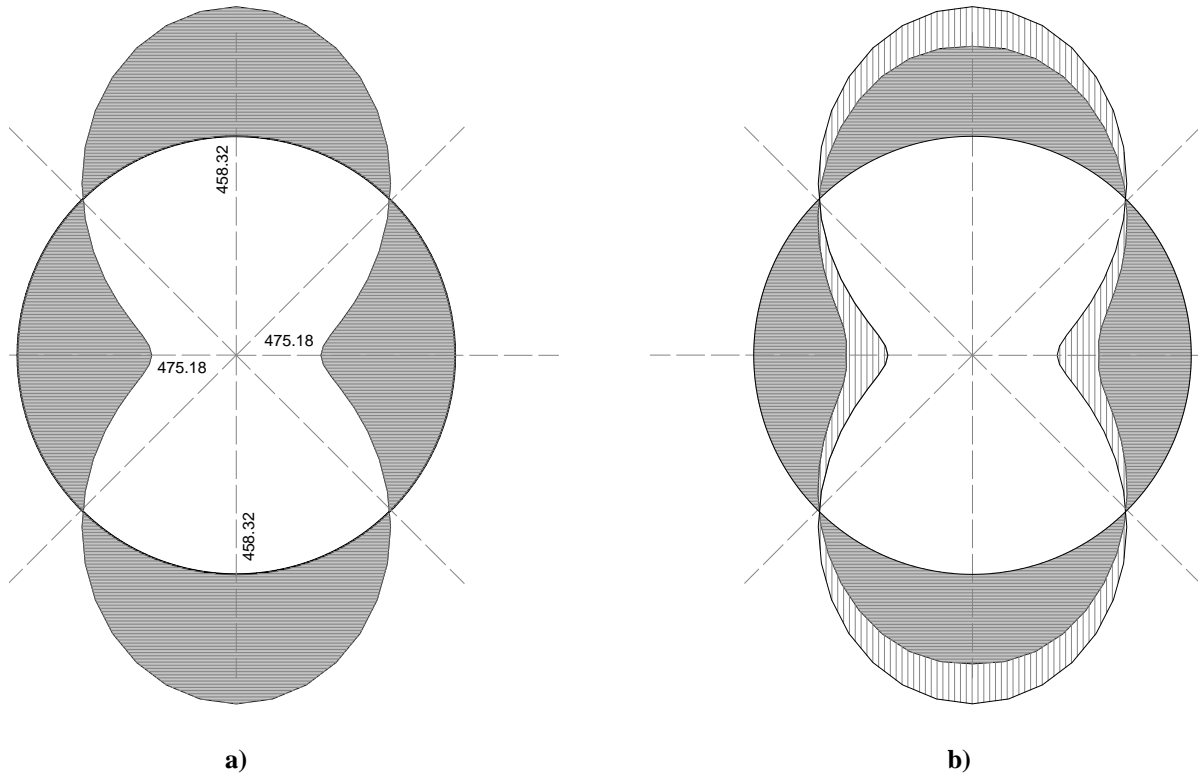


Figura 5.173. Momentos flexionantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$). a) suma de los momentos de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

Los cortantes máximos que se registraron en el anillo de doble revestimiento están en las zonas donde los momentos son nulos. Estas zonas se localizan aproximadamente a 45° , 135° , 225° y 315° , como se muestra en la Figura 5.174. La magnitud de estos cortantes es simétrica en el anillo ya que las características del mismo y las cargas son también simétricas. Se observa también que los cortantes máximos absolutos están aproximadamente en las zonas a 45° y 225° , como se muestra en la Figura 5.175.

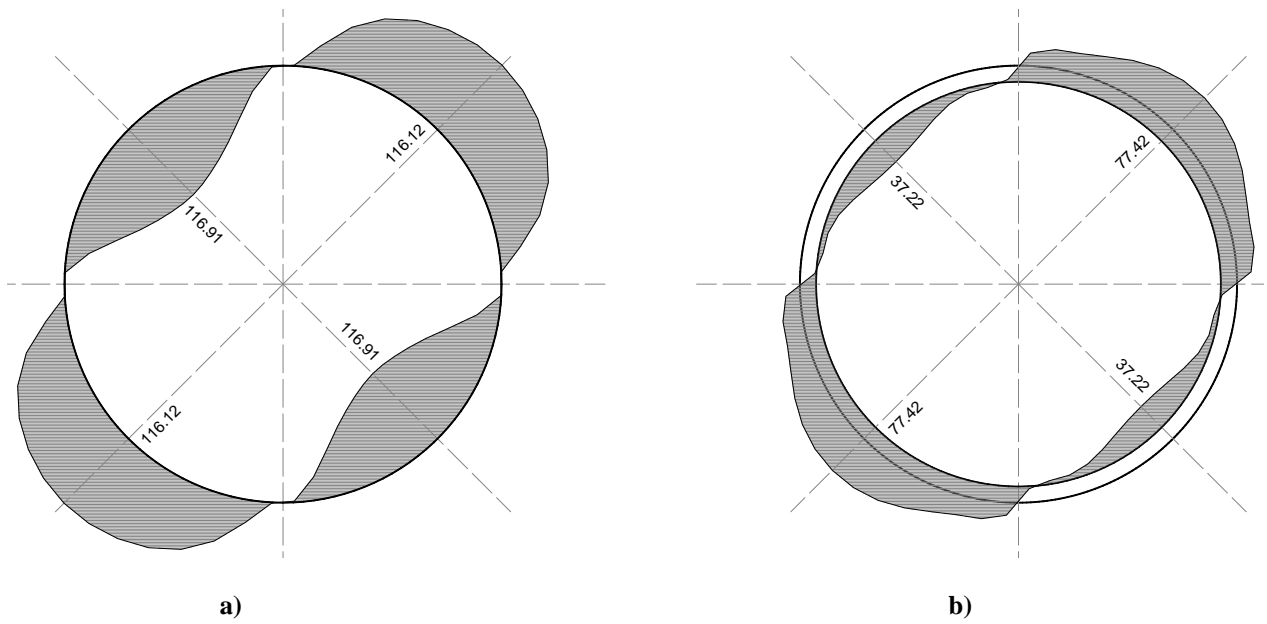


Figura 5.174. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$) en: a) revestimiento primario y b) revestimiento secundario.

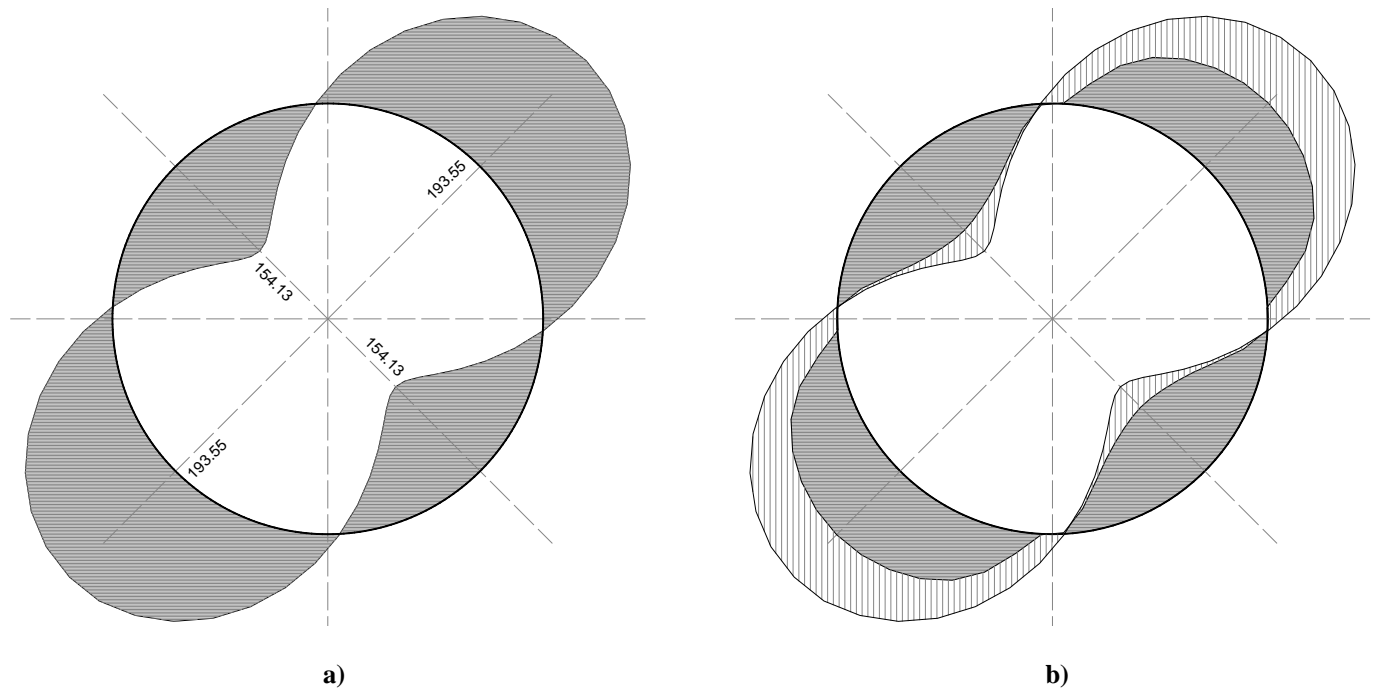


Figura 5.175. Cortantes en anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$). a) suma de los cortantes de ambos revestimientos y b) contribución por separado de ambos revestimientos.

La Figura 5.176a corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre la primer articulación, a una distorsión diametral de 0.58%, y la Figura 5.176b corresponde a la deformada del anillo cuando ocurre el colapso, a una distorsión diametral de 3.57%. Como se observa en dichas figuras, el anillo se alarga en el sentido horizontal y se acorta en el vertical.

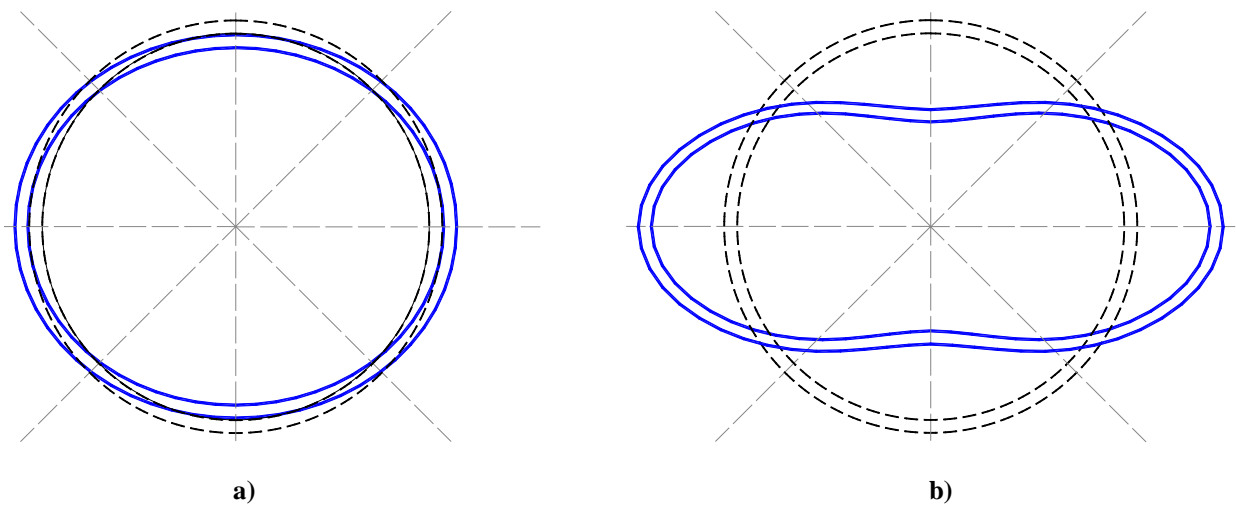


Figura 5.176. Deformadas de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$) cuando ocurre: a) primer articulación y b) colapso (aumentadas 25 veces)

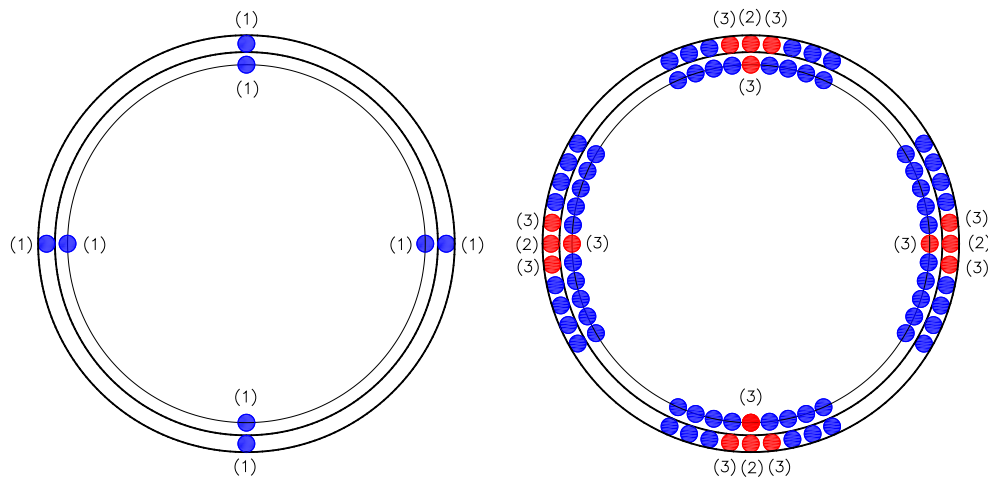


Figura 5.177. Mecanismo de colapso de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$)

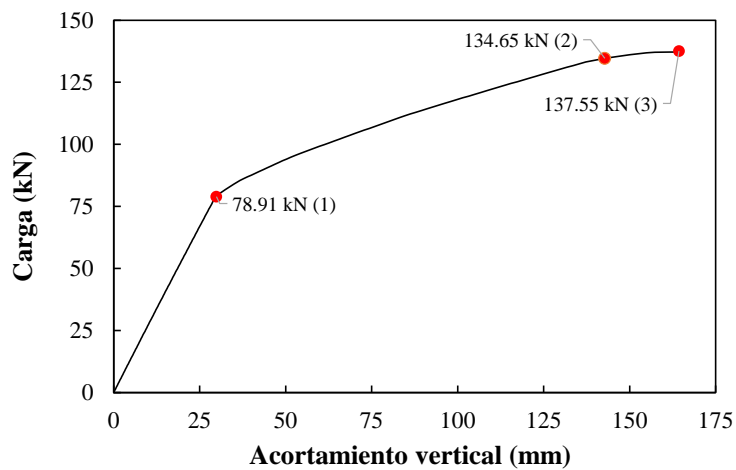


Figura 5.178. Curva de capacidad de anillo aislado continuo y revestimiento ($K=0.60$)

Como se muestra en la Figura 5.177, el anillo colapsa al articularse 12 puntos en el revestimiento primario y 4 puntos en el revestimiento secundario. Dichos puntos están localizados exactamente a 0° , 90° , 180° y 270° . El mecanismo de colapso se muestra sobre la curva de capacidad en la Figura 5.178 y se describe a continuación:

- 1.- Comienza a agrietarse el revestimiento primario y secundario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 78.91 kN y una distorsión diametral de 0.58%.
- 2.- Se articula el revestimiento primario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 134.65 kN.
- 3.- Se articulan más puntos en el revestimiento primario en las zonas de clave, cubeta y hastiales y, además, se articula el revestimiento secundario en las zonas de clave, cubeta y hastiales a una carga de 137.55 kN y una distorsión diametral de 3.57%.

5.5.16 Comparación entre modelos.

Al observar las curvas de capacidad de los modelos 5.5.1 a 5.5.7, mostradas en la Figura 5.179, puede concluirse lo siguiente:

- 1.- La posición de las juntas en el anillo aislado influye en su capacidad de carga y distorsión de colapso. En el caso de las dos posiciones evaluadas, el anillo colocado en “posición fuerte” tuvo un incremento del 11% en la capacidad de carga y un 39% en la distorsión de colapso respecto a la del anillo colocado en “posición débil”.
- 2.- Independientemente de la posición de las juntas y de si se considera o no la interacción entre anillos, la rigidez elástica del anillo es similar.
- 3.- Considerar la interacción entre anillos aumenta la capacidad de carga y permite desarrollar mayores distorsiones. En el caso de las posiciones evaluadas, el conjunto de anillos colocado en “posición fuerte” tuvo un incremento del 17% tanto en capacidad de carga como en la distorsión de colapso respecto a la del anillo colocado en “posición fuerte”.
- 4.- La rigidez elástica de los anillos sin revestimiento es muy similar (aproximadamente 6.5×10^6 N/m), inclusive la del anillo continuo. La razón por la que dichas rigideces son muy similares se atribuye principalmente a la relación de cargas K_0 , ya que al tener un valor muy cercano a 1.0, el comportamiento del anillo se asemeja al de un anillo continuo.
- 5.- La rigidez y capacidad de carga del anillo aislado aumentó aproximadamente 40% con la presencia del revestimiento secundario.

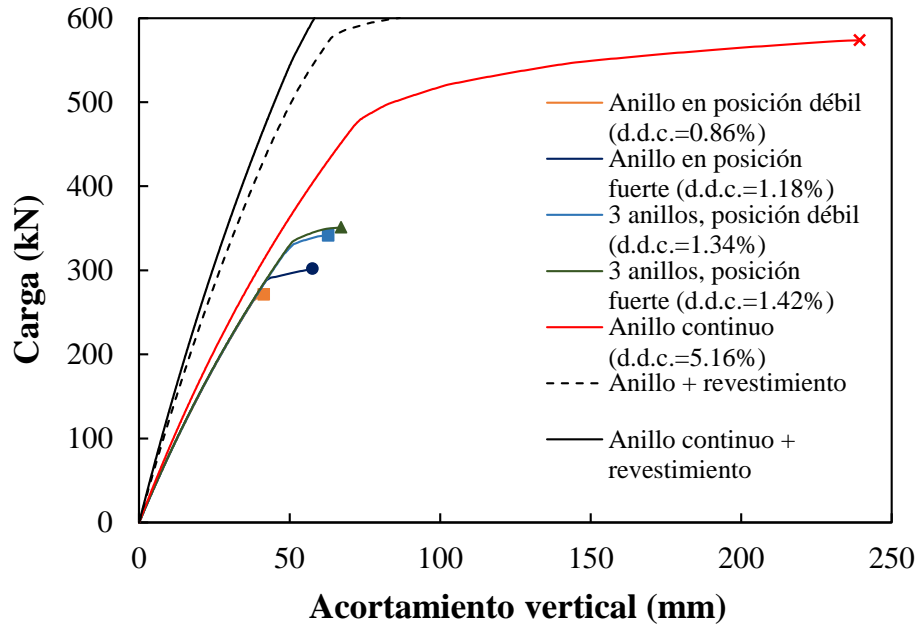


Figura 5.179. Comparación de curvas de capacidad de anillos para un $K_0=0.93$ y diferentes condiciones (ausencia/presencia/posición de juntas, ausencia/presencia de revestimiento, interacción entre anillos).

Al observar las curvas de capacidad de los modelos 5.5.8 a 5.5.15, mostradas en la Figura 5.180, puede concluirse lo siguiente:

- 1.- La rigidez elástica del anillo con juntas y revestimiento es similar a la rigidez elástica del anillo continuo y revestimiento, independientemente de la relación de cargas K_0 , como se observa en la Figura 5.181.
- 2.- La rigidez de colapso del anillo con juntas y revestimiento es similar a la rigidez de colapso del anillo continuo y revestimiento hasta una relación de cargas $K_0=0.70$. Sin embargo, para valores mayores, el modelo que considera las juntas tiende a ser más rígido, como se muestra en la Figura 5.182.
- 3.- A valores menores de K_0 , la relación Δ_u/Δ_y del anillo con juntas y revestimiento es mayor, como se muestra en la Figura 5.183.
- 4.- A valores mayores de K_0 , la distorsión diametral en la que ocurre la primera fluencia en el anillo con juntas y revestimiento tiende a ser mayor, como se muestra en la Figura 5.184.
- 5.- A valores mayores de K_0 , la distorsión diametral en la que ocurre el colapso tiende a ser mayor, como se muestra en la Figura 5.185.
- 6.- Independientemente de la relación de cargas (K_0), modelar el revestimiento primario como un anillo continuo sobreestima la capacidad de carga y ductilidad del túnel.

7.- La mínima distorsión de colapso observada en los modelos de anillos con juntas y revestimiento fue de 1.44%.

8.- La mínima distorsión de colapso observada en los modelos de anillos continuos y revestimiento fue de 3.57%.

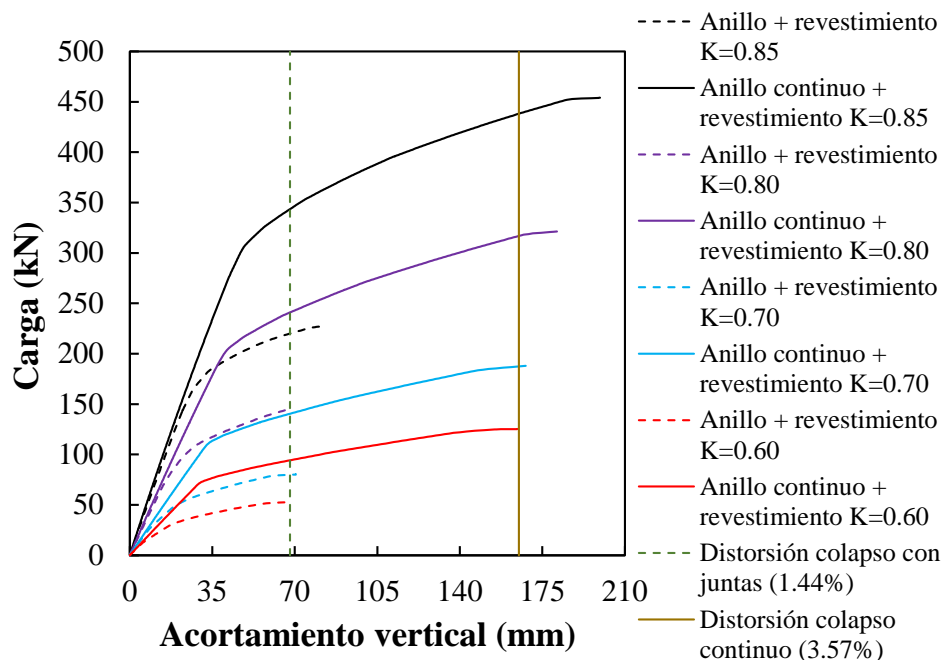


Figura 5.180. Comparación de curvas de capacidad de anillo aislado con revestimiento (con y sin juntas) para diferentes relaciones de carga K_0 .

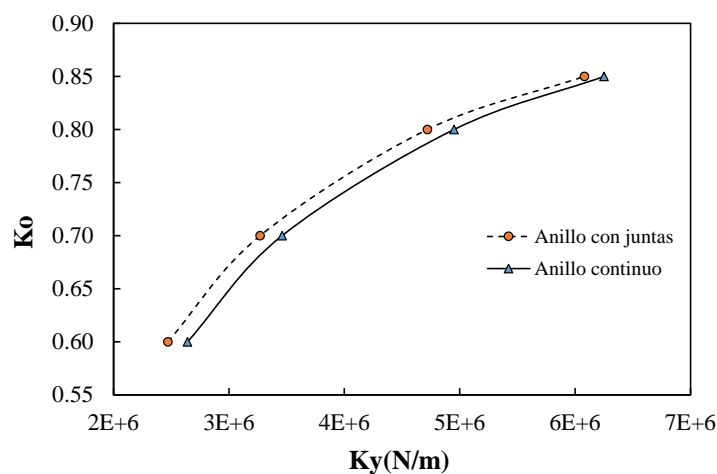


Figura 5.181. Comparación de las rigideces elásticas K_y de modelos con revestimiento con y sin juntas para diferentes valores de la relación de cargas K_0 .

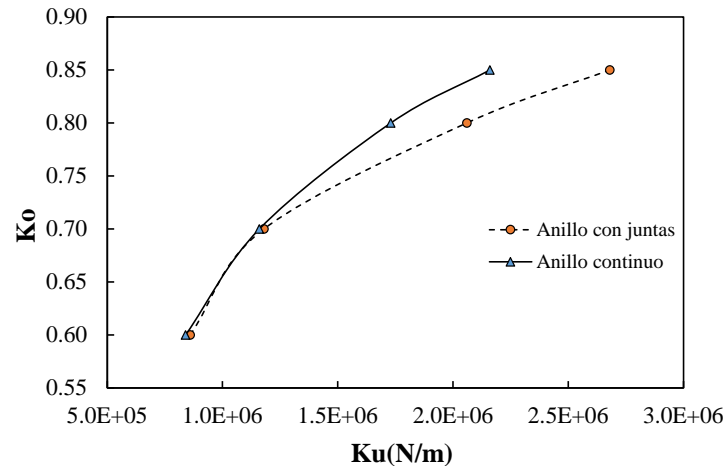


Figura 5.182. Comparación de las rigideces de colapso K_u de modelos con revestimiento con y sin juntas para diferentes valores de la relación de cargas K_0 .

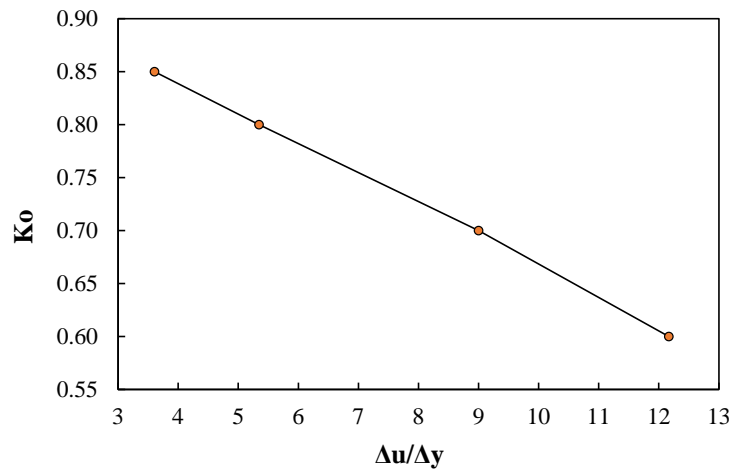


Figura 5.183. Comparación de la ductilidades $\Delta u / \Delta y$ de modelos con juntas y revestimiento para diferentes valores de la relación de cargas K_0 .

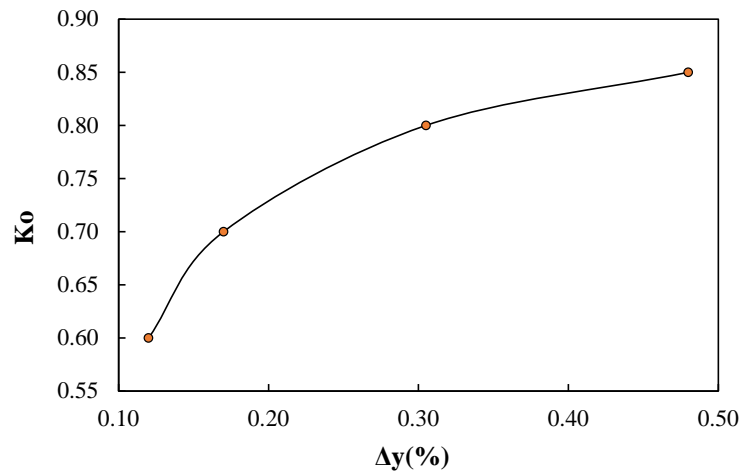


Figura 5.184. Comparación de distorsiones en la primera fluencia Δy para diferentes valores de relaciones de carga K_0 .

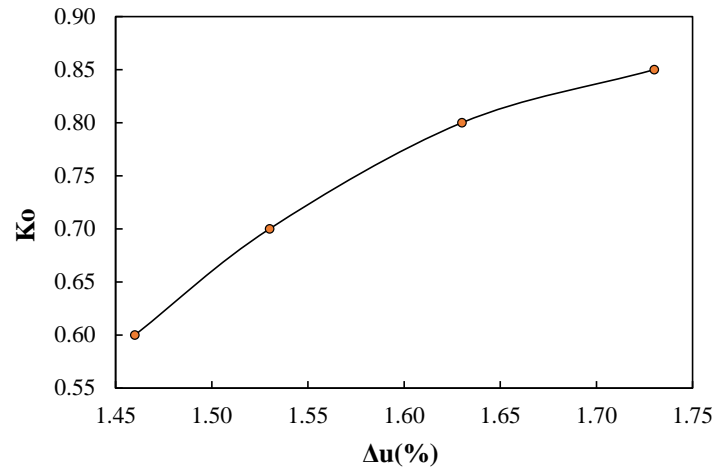


Figura 5.185. Comparación de distorsiones de colapso Δu para diferentes valores de relaciones de carga K_0 .

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se proporciona un procedimiento detallado para modelar túneles dovelados con y sin revestimiento secundario utilizando modelos simplificados. Aunque los modelos que se realizaron en este trabajo se desarrollaron en el programa ANSYS, el procedimiento para calcular los modelos constitutivos a flexión de las dovelas, momento rotación en las juntas longitudinales y de interacción es independiente del programa y puede analizarse la posibilidad de desarrollar estos mismos modelos en otro programa comercial.

En el caso del cálculo del modelo constitutivo momento – rotación de la juntas longitudinales, se utilizó la relación propuesta por Jansen (1983), la cual supone una carga axial constante, y se observó en el modelo numérico del BRT que utilizar esta relación produce resultados razonables. Sin embargo, debe destacarse que la carga de ovalización utilizada para cargar el modelo de éste túnel tenía una relación $Ph/Pv = 0.91$, por lo que la variabilidad de la carga axial es pequeña, y entonces no impacta tanto en los resultados. Sin embargo, cuando la relación Ph/Pv es más crítica (cuando tiende a cero), como en el caso del modelo del túnel ICA, la variabilidad de la carga axial es mayor, y utilizar la relación propuesta por Jansen (1983) podría no ser lo más adecuado. En este caso y, si se utiliza la relación propuesta por Jansen, debe iterarse la carga axial hasta que ésta se aproxime a la carga axial supuesta.

Se muestran los mecanismos de colapso que pueden desarrollarse en un anillo de dovelas dependiendo de si éste trabaja aislado o en conjunto, ya sea con otros anillos, con el revestimiento secundario, o ambos. Si el anillo está aislado su capacidad depende de la capacidad de las juntas longitudinales. Si el anillo trabaja en conjunto, su capacidad es mayor, la cual depende de la capacidad de la sección transversal de las dovelas y/o del revestimiento secundario.

A diferencia de otros trabajos como el de Lutikhlot (2007) y Hernández *et al.* (2014) en los que sólo reportan las curvas de capacidad del modelo experimental del BRT, en este trabajo además se mostró como ocurren las articulaciones y la magnitud de la carga en la que ocurren, así como los mecanismos de colapso que se desarrollan en el experimento de baja y alta interacción entre anillos. Además se explica la influencia que tiene el daño de la primera prueba (C01) en la segunda (C02).

Los modelos numéricos realizados en este trabajo representan adecuadamente el comportamiento estructural de túneles dovelados según lo observado en los resultados reportados en la literatura. No obstante, éstos tienen limitaciones cuando se modela el túnel

con revestimiento secundario, puesto que las inercias de la sección compuesta se subestiman y por ende, la rigidez del modelo. Debe tomarse también en cuenta que, aunque el modelo experimental y numérico del túnel BRT son congruentes, deberían hacerse más pruebas experimentales para validar los modelos.

En este trabajo se demostró el uso de modelos simplificados con elementos viga y la ocurrencia de articulaciones para incluir los efectos de daño ocurridos en etapas previas. Estos modelos reducen el costo computacional comparado con modelos con elementos finitos en 3D.

De lo observado en el modelo paramétrico de doble revestimiento de sección variable se concluye lo siguiente:

- La interacción entre anillos proporciona más capacidad de carga al túnel, por lo que es deseable asegurar dicha interacción en la práctica con el acoplamiento mecánico, ya que se tiene incertidumbre de la carga axial remanente de la TBM que propicia la interacción entre anillos por fricción.
- La interacción entre anillos mejora el aprovechamiento de la capacidad total de las dovelas. Si no es así, la capacidad del anillo dovelado depende de la capacidad de las juntas longitudinales.
- La presencia del revestimiento secundario incrementa considerablemente la rigidez del anillo, sobre todo en la zona de la cubeta donde el espesor de dicho revestimiento es mayor. No obstante, los cortantes en la transición del espesor del revestimiento secundario aumentan, y en la práctica deben detallarse esas zonas para resistir dichos cortantes.

El modelo numérico desarrollado del túnel ICA aún puede mejorarse, puesto que no se tiene certeza de los valores utilizados para calcular los modelos constitutivos colocados en el modelo, posiciones de las juntas, carga axial para la interacción entre anillos, etc., razón por la cual existen variaciones importantes en los resultados reportados del experimento y los resultados del modelo numérico.

De lo observado en el modelo paramétrico de doble revestimiento de sección constante se concluye lo siguiente:

- La posición de las juntas en el anillo aislado influye en su capacidad de carga y distorsión de colapso. Como regla, entre más alejadas estén las juntas longitudinales de los puntos críticos (0° , 90° , 180° y 270°), mayor será la capacidad de carga del anillo dovelado. Como ejemplo, de las posiciones mostradas en la Figura 6.1, la Figura 6.1a será la más débil y la Figura 6.1c la más fuerte.

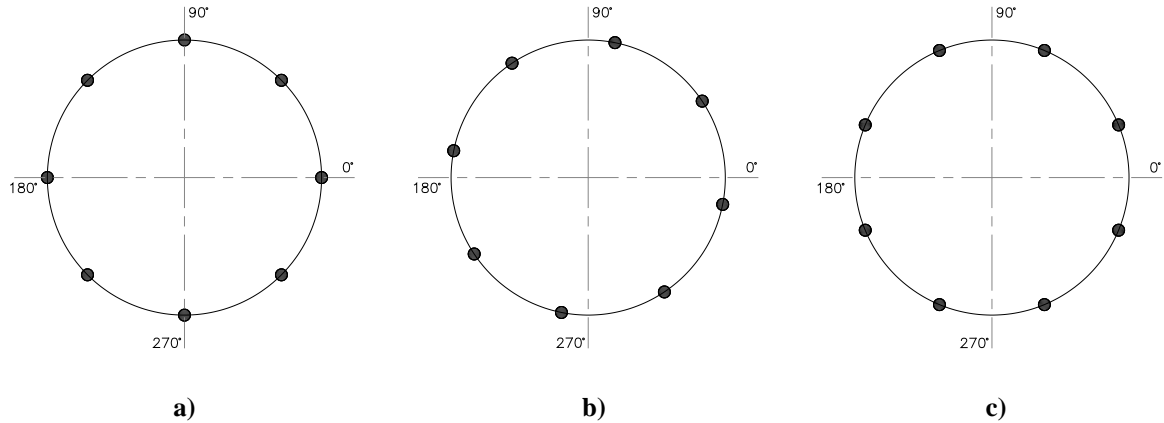


Figura 6.1. Diferentes posiciones de juntas en un anillo ordenadas de la más débil (a) a la más fuerte (c)

- Independientemente de la posición de las juntas y de si se considera o no la interacción entre anillos, la rigidez elástica del anillo es similar.
- Considerar la interacción entre anillos aumenta la capacidad de carga y permite desarrollar mayores distorsiones.
- La rigidez elástica del anillo con juntas y revestimiento es similar a la rigidez elástica del anillo continuo y revestimiento, independientemente de la relación de cargas K_0 .
- A valores menores de K_0 , la relación Δ_u/Δ_y del anillo con juntas y revestimiento es mayor.
- A valores mayores de K_0 , la distorsión diametral en la que ocurre la primera fluencia en el anillo con juntas y revestimiento tiende a ser mayor.
- A valores mayores de K_0 , la distorsión diametral en la que ocurre el colapso tiende a ser mayor.
- Independientemente de la relación de cargas (K_0), modelar el revestimiento primario como un anillo continuo sobreestima la capacidad de carga y ductilidad del túnel.

En el apéndice se desarrolló un procedimiento para calcular la curva momento – curvatura, de la cual es difícil encontrar información clara en la literatura de como calcularse. Además, se provee un código para calcular dicha curva para una sección rectangular de dos lechos de acero en el programa MATLAB. No obstante, también se comprobó que la curva que proporcionan los programas SAP200 y ETABS en la opción de “*section designer*” es aceptable, por lo que el diseñador de la práctica puede utilizar estos programas para calcularlos.

Referencias

- [1] Blom CBM (2002). “Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils”. Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos.
- [2] Blom CBM (2003). “The structural (un)safety of tunnels explained by analytical approach”. Heron, Vol. 48, No. 1, pp. 17-32.
- [3] BTS (2004). “Tunnel lining design guide”. The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers. Thomas Telford Ltd, London.
- [4] Galván A (2013). “Comportamiento estructural de túneles con dovelas prefabricadas en suelo blando”. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [5] Hefny AM, Tan FC y Macalevey NF (2004). “Numerical study on the behaviour of jointed tunnel lining”. Journal of the Institution of Engineers, Singapur. Vol. 44, No. 1, pp. 108-118.
- [6] Janssen P (1983). "Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings". Reporte, University of Braunschweig, Departamento de Ingeniería Civil, Instituto de Análisis Estructural, No. 83 - 41, Alemania.
- [7] Lutikholt AJT (2007). “Ultimate limit state analysis of a segmented tunnel lining – Results of full-scale tests compared to finite element analysis –”. Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos.
- [8] Peña F y Basurto B (2014). “Factor de reducción de rigidez para anillos de dovelas de concreto reforzado en túneles”. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Vol. 6, No. 2, pp. 2-14.
- [9] Peña F (2012). “Comportamiento estructural de juntas entre dovelas de concreto prefabricado para túneles”. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Vol. 3, No. 2, pp. 2-18.
- [10] Tenorio E y Juárez G (2013). “Simulación del colapso en túneles dovelados mediante la formación de articulaciones en vigas”. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Vol. 4, No. 2, pp. 43-55.
- [11] Pham B H (2009). “Stress-resultant models for optimal design of reinforced-concrete frames”. Tesis Doctoral. Cachan, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 101 p.

- [12] Aguilar O, Mendoza L, Tavera E, Alberto Y y Morelos J (2011). “Prueba de carga en un modelo a escala real de un túnel de dovelas con revestimiento secundario”. Conferencia, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Canada.
- [13] Hordijk D, F Gijsbers y P Boortunnels (1996). “Laboratoriumproeven tunnel segmenten”. Reporte Interno K100-W-026, TNO-Bouw, Delft.
- [14] Park R y Paulay T (1978). “Estructuras de concreto reforzado”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Canterbury, Nueva Zelandia. Sexta edición (1992), Limusa.
- [15] Van der Waart van Gulik TG (2010). “Snap through of large shield driven tunnels”. Tesis de Maestría, TU Delft University of Technology, Países Bajos.
- [16] Blom CBM y van Oosterhout, GPC (2001). “Full-scale laboratory test on a segment lining”. Reporte técnico, Project Organization HSL South, Delft, Países Bajos.
- [17] Leonhard F y Reimann H (1966). “Betongelenke, Der Bauingenieur”. 41, pp. 49-56.
- [18] Tena A (2007). “Análisis de estructuras con métodos matriciales”. Primera edición, Limusa, México.
- [19] Conde J y Aparicio J (2004). “Estudio de la capacidad de redistribución en emparrillados bajo régimen no lineal”. Trabajo final de máster, Madrid.
- [20] Hernández G, Peña F y Chávez A (2014). “Análisis estructural de túnel dovelado con juntas inelásticas entre dovelas”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [21] Ansys (2013). ANSYS Mechanical APDL Theory Reference.

PARTE IV

APÉNDICES

A. Cálculo de diagramas momento-curvatura

Es posible determinar curvas teóricas momento – curvatura para secciones de concreto reforzado en base a suposiciones semejantes a las utilizadas para la determinación de la resistencia a flexión. Se supone que las secciones transversales permanecen planas hasta alcanzar fluencia en el acero o agrietamiento en el concreto, cuyo comportamiento depende de las curvas esfuerzo deformación del concreto y del acero.

El modelo constitutivo para determinar los esfuerzos en el acero se muestra en la Figura A. 1, donde el esfuerzo de fluencia es de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ y el esfuerzo último es de $f_u = 1.5f_y = 6300 \text{ kg/cm}^2$. La deformación en el acero, cuando este ha alcanzado el esfuerzo de fluencia, es 0.0021, después del cual permanece en un valor constante (f_y) hasta una deformación unitaria de 0.01 donde presenta endurecimiento por deformación hasta que alcanza su f_u , igual a 1.5 veces f_y a una deformación unitaria de 0.1.

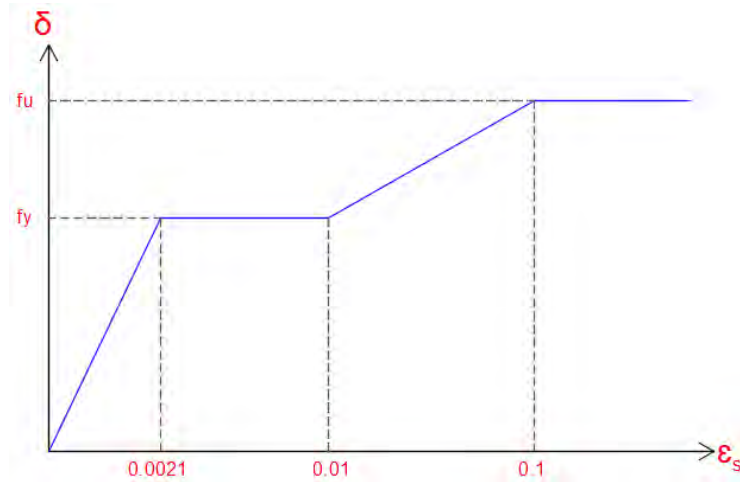


Figura A. 1 Modelo constitutivo del acero

Para el cálculo de la fuerza de compresión en el concreto se consideró un diagrama esfuerzo – deformación para el concreto con una rama ascendente parabólica y una rama descendente lineal, como se muestra en la Figura A. 2, cuyas ecuaciones son:

$$f_c = f'_c \left\{ \frac{2\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad \text{para} \quad 0 \leq \varepsilon_{cm} \leq \varepsilon_0 \quad (\text{A.1})$$

$$f_c = f'_c \{ 1 - 100(\varepsilon_{cm} - \varepsilon_0) \} \quad \text{para} \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{cm} \leq \varepsilon_{cu} \quad (\text{A.2})$$

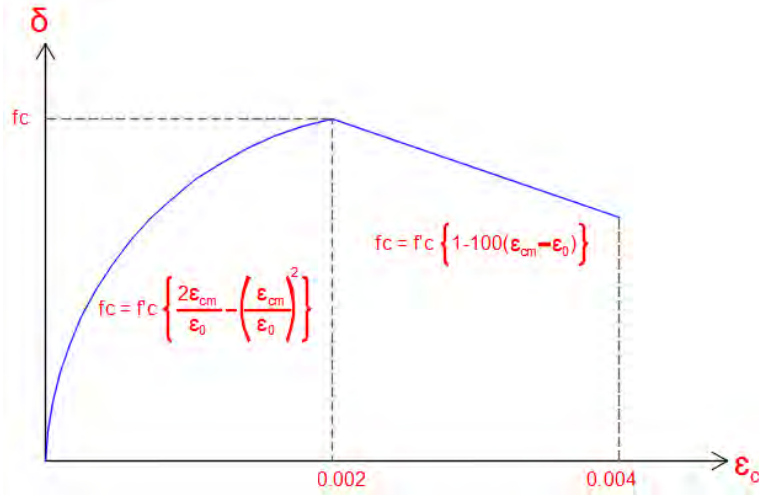


Figura A. 2 Modelo constitutivo del concreto simplificado de Hognestad (tomado de Park y Pauley 1986).

Para determinada deformación del concreto en la fibra extrema de compresión ε_{cm} y una profundidad kd del eje neutro, se pueden determinar las deformaciones del acero ε_{s1} , ε_{s2} , ..., ε_{sn} , por triángulos semejantes del diagrama de deformaciones. Por ejemplo, para el lecho de varillas inferior (Figura A. 3):

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cm} \left(\frac{d - kd}{kd} \right)$$

Posteriormente se determinan los esfuerzos f_{s1} , f_{s2} , ..., f_{sn} , correspondientes a las deformaciones ε_{s1} , ε_{s2} , ..., ε_{sn} , a partir de la curva esfuerzo – deformación para el acero. En seguida se determinan las fuerzas del acero F_{s1} , F_{s2} , ..., F_{sn} , a partir de los esfuerzos del acero y las áreas del mismo.

Se determina la distribución del esfuerzo del concreto en la zona a compresión de la sección a partir del diagrama de deformaciones y la curva esfuerzo – deformación para el concreto. Para cualquier deformación dada del concreto, ε_{cm} , en la fibra extrema a compresión, se puede definir la fuerza de compresión del concreto, C_c , y su posición en términos de los parámetros α y γ . Donde:

$$C_c = \alpha f'_c b k d \quad (A.3)$$

$$\alpha = \frac{\int_0^{\varepsilon_{cm}} f_c d\varepsilon_c}{f'_c \varepsilon_{cm}} \quad (A.4)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} \epsilon_c f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c} \quad (A.5)$$

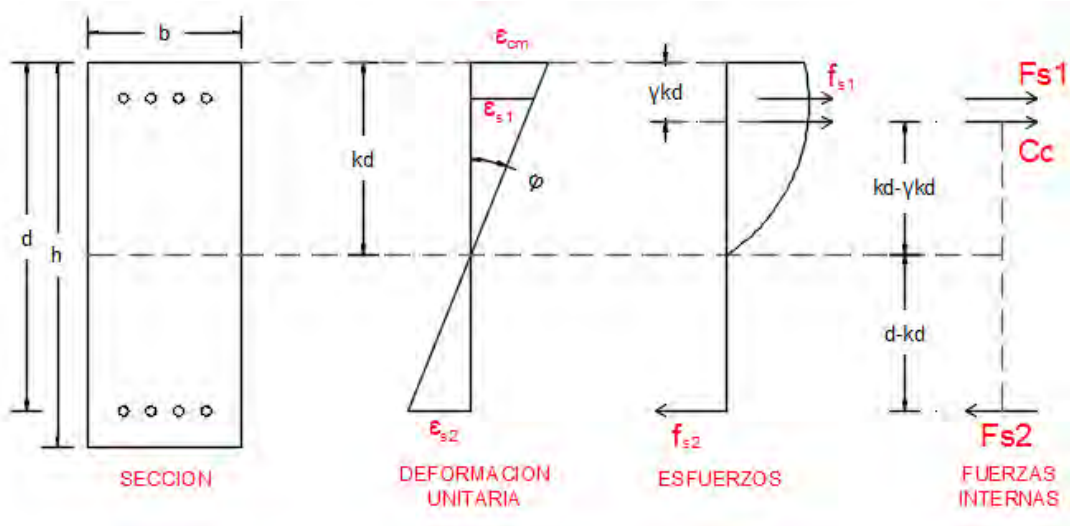


Figura A. 3 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas internas resultantes.

La relación teórica momento – curvatura se calcula incrementando la deformación del concreto en la fibra ϵ_{cm} extrema a compresión. Para cada valor de ϵ_{cm} se encuentra la profundidad kd del eje neutro que satisface el equilibrio de fuerzas. Entonces, se utilizan las fuerzas internas y la profundidad del eje neutro encontrados de esa manera para determinar el momento M y curvatura ϕ .

$$\phi = \frac{\epsilon_{cm}}{kd} \quad (A.6)$$

En resumen, el diagrama momento-curvatura se calcula mediante el proceso iterativo siguiente:

- 1.- Se propone una deformación unitaria para la fibra extrema a compresión en el concreto ϵ_{cm} , empezando a variar dicha deformación desde valores muy pequeños (0.0002 por ejemplo), hasta valores un poco mayores a ϵ_{cu} (0.006 por ejemplo).
- 2.- Con un valor fijo de ϵ_{cm} para la presente iteración, ahora se variará la profundidad del eje neutro kd hasta encontrar una deformación tal que los esfuerzos en todos los lechos de acero debajo del eje neutro provoquen fuerzas internas en tensión, los cuales se equilibren con las fuerzas generadas por el bloque de esfuerzos en compresión situado arriba del eje neutro.

$$Cc + \sum_{i=1}^n Fs_{i\text{compresion}} = \sum_{i=1}^n Fs_{i\text{tension}} \quad (\text{A.7})$$

En este paso deben tomarse las consideraciones siguientes:

- Cuando aún no se alcance el valor máximo de la deformación unitaria en la fibra extrema a tensión en el concreto, éste aportará resistencia a tensión debajo del eje neutro.
- Cuando la fibra extrema en tensión en el concreto alcance la deformación unitaria a la ruptura, aparecerá la primera grieta y se supondrá que toda la sección debajo del eje neutro está agrietada y no aporta resistencia a tensión. Entonces, sólo los lechos de acero situados debajo del eje neutro aportarán resistencia a tensión.

3.- Una vez encontrada la posición del eje neutro k_d que satisfaga el punto anterior, se calculará el momento generado por las fuerzas internas, multiplicando dichas fuerzas con su brazo de palanca respecto al eje neutro.

4.- La curvatura del elemento se obtiene dividiendo la deformación unitaria del concreto ϵ_{cm} entre la profundidad del eje neutro k_d encontrada.

5.- Se grafica el punto $M - \phi$ encontrado.

6.- Nuevamente, se incrementa el valor de ϵ_{cm} y se realizan los pasos 1 a 5.

El proceso para calcular el diagrama $M - \phi$ descrito en este anexo se programó en el lenguaje de programación de MATLAB. Esta rutina consta de 101 líneas de código, las cuales se muestran a continuación:

```
clc;
clear all;
b=150; %Ancho de la sección
eo=0.002; %No cambiar
fcc=275.23; %f'c del concreto
h=40; %altura de la sección
d=36; %profundidad del lecho inferior de acero
d2=4; %profundidad del lecho superior de acero
d3=20; %profundidad de la sección en la que se aplica la carga axial
N=206647; %carga axial
Es=2038735.98; %Modulo de elasticidad del acero en la primera pendiente
Es2=23007.76; %Modulo de elasticidad del acero en la segunda pendiente
As=9.72; %Area del acero del lecho inferior
As2=9.72; %Area del acero del lecho superior
fy=4434.25; %Esfuerzo de fluencia del acero
fu=6651.38; %Esfuerzo último del acero
ecmnue=0;

syms ec
fc1 = fcc*((2*(ec/eo))-(ec/eo)^2); %Funcion esfuerzo deformacion del
concreto antes de eo=0.002
```

```

    fc2 = fcc*(1-100*(ec-eo)); %Funcion esfuerzo deformacion del concreto
    despues de eo=0.002
    fc3 = fcc*((2*(ec/eo))-(ec/eo)^2)*ec;

for I=1:25

DIF=5002;
cont=0;

if I>3
    inc=0.0001;
else
    inc=0.0004;
end
    ecm(I)=ecmnue+inc; %Propuesta de la deformacion unitaria de la fibra
    extrema del concreto en compresion
if ecm(I)<=(0.003)
    fc = fc1; %Si la deformacion del concreto es menor a 0.002, calcular
    fc con la funcion no 1 (cuadratica)
else
    fc = fc2; %Si la deformacion del concreto es menor a 0.002, calcular
    fc con la funcion no 2 (lineal descendente)
end
    resultado(I)=int(fc,ec,0,ecm(I)); %Integra la funcion fc, dependiendo si
    vale fc1 o fc2 del paso anterior
    alfa(I)=resultado(I)/(ecm(I)*fcc); %Calcula el valor de alfa
    resultado2(I)=int(fc3,ec,0,ecm(I)); %Integra la funcion fc3 para el
    calculo de gama
    gama(I)=1-(resultado2(I)/(resultado(I)*ecm(I))); %Calcula el valor de
    gama
while (DIF>500)
    if DIF<5000 %Condicional que ayuda a acelerar el calculo, para
    diferencia grandes aumenta la prof del eje neutro en cantidades mas
    grandes
        cont=cont+0.01;
    else
        cont=cont+0.1;
    end
        kd(I)=h-cont; %Itera la profundidad del eje neutro
        es2(I)=(ecm(I)*(kd(I)-d2))/kd(I); %Calcula la deformacion unitaria del
        acero en funcion de la deformacion del concreto y la prof del eje neutro
        propuestas
        fs2=es2(I)*Es; %Esfuerzo del acero en compresion
if es2(I)<(0.0021)
    Fs2=fs2*As2; %Si la deformacion en el acero es menor a 0.0021, la
    fuerza en tension es igual al esfuerzo por el area de acero
elseif (0.0021)<es2(I)<0.01
    Fs2=fy*As2; %Si la deformacion en el acero es mayor a 0.0021 pero
    menor a 0.01, la fuerza en tension es igual al esfuerzo de fluencia por
    el area de acero
elseif es2(I)>0.01
    Fs2=fy*As2+((es2(I)-0.01)*Es2*As2); %Si la deformacion en el acero es
    mayor a 0.01, la fuerza en tension es igual al esfuerzo de fluencia por
    el area de acero +
end

```



```

Cc=alfa(I)*fcc*b*kd(I)*0.85+Fs2; %Calcula la resultante de la fuerza en
compresion
es(I)=(ecm(I)*(d-kd(I)))/kd(I); %Calcula la deformacion unitaria del
acero en funcion de la deformacion del concreto y la prof del eje neutro
propuestas
fs=es(I)*Es; %Esfuerzo del acero en tension
if es(I)<(0.0021)
    Fs=fs*As; %Si la deformacion en el acero es menor a 0.0021, la fuerza
en tension es igual al esfuerzo por el area de acero
elseif (0.0021)<es(I)<0.01
    Fs=fy*As;%Si la deformacion en el acero es mayor a 0.0021 pero menor
a 0.01, la fuerza en tension es igual al esfuerzo por el area de acero
elseif es(I)>0.01
    Fs=fy*As+((es(I)-0.01)*Es2*As); %Si la deformacion en el acero es
mayor a 0.01, la fuerza en tension es igual al esfuerzo de fluencia por
el area de acero +
% elseif es(I)>0.1
%     Fs=fu*As;
end
eci(I)=(ecm(I)*(h-kd(I)))/(kd(I); %deformacion unitaria en la fibra inferior
del concreto (tension)
if eci(I)<=(0.0001)
    ft=(eci(I)*2*sqrt(fcc))/(0.001);
    Ft=b*(h-kd(I))*ft;
else
    Ft=0;
end
Ftotal=Fs+Ft+N;
DIF=abs(Cc-Ftotal); %Diferencia entre la fuerza de compresion y tension
%Inicia nuevo ciclo si la diferencia es mayor a 100
end
%Si la diferencia entre la fuerza de compresion y la de tension es menor
a
%100 prosigue con los siguientes calculos
kd(I)
Cc(I)=Cc;
Fs(I)=Fs;
if kd>d3
    N2=-N;
else
    N2=N;
end
DIF(I)=DIF;
M(I)=Cc(I)*(kd(I)-gama(I)*kd(I))+Fs(I)*(d-kd(I))+Ft*(h-
kd(I))/2+N2*abs(d3-kd(I)); %Calculo del momento
Md(I)=double(M(I));
k(I)=ecm(I)/kd(I); %Calculo de la curvatura
ecmnue=ecm(I);
end
figure
plot(k,M) %Grafica curvatura en las abscisas y Momento en las ordenadas
grid on

```

Los valores asignados a las variables del código mostrado anteriormente, corresponden al cálculo de la curva momento – curvatura de la sección de las dovelas del túnel BRT.

B. Ejemplos numéricos

B.1 Viga doblemente reforzada

B.1.1 Momento incremental en el extremo

Para validar el procedimiento para el cálculo de la curva momento – curvatura descrito en el Apéndice A, se obtiene el diagrama momento-curvatura de una sección de concreto doblemente reforzada cuyas características se describen a continuación (tomadas de Pham 2009): sección transversal $b \times h = 20 \times 50$ cm, 2 varillas de refuerzo longitudinal de $\phi = 8$ mm colocadas en la parte superior, y 2 de $\phi = 32$ mm colocadas en la parte inferior como se muestra en la Figura B. 1a. Las propiedades mecánicas del concreto son: $E_c = 32,272$ MPa y $f'_c = 38.3$ MPa. Las propiedades mecánicas del acero de refuerzo son: $E_s = 200,000$ MPa y $f_y = 400$ MPa. En este ejemplo sólo se aplicó un momento incremental en el extremo de la viga, tal como se muestra en la Figura B. 1b.

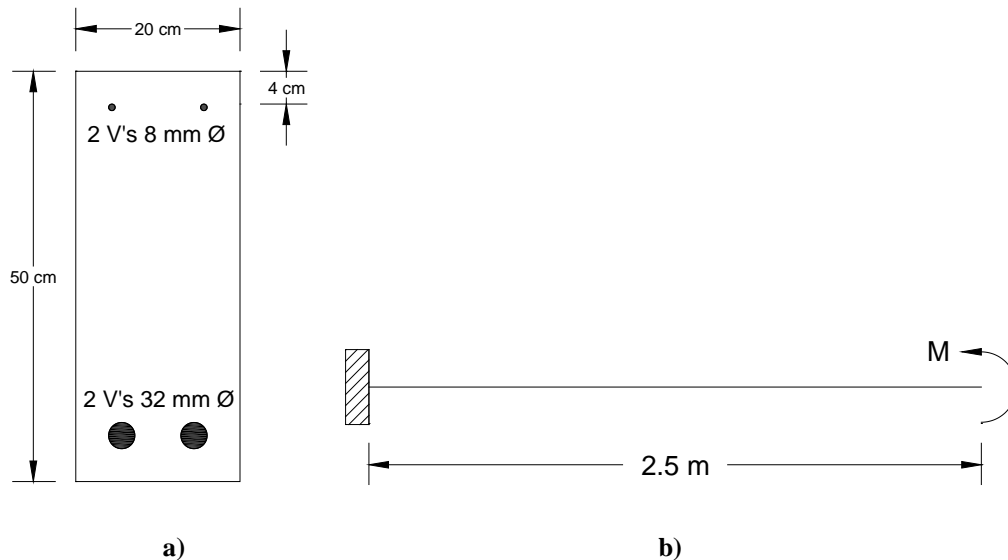


Figura B. 1 a) Sección transversal y b) viga en voladizo

Al tratarse de un cálculo iterativo para determinar el diagrama momento - curvatura, se usó el programa MATLAB, que permite hacer este tipo de cálculos. El diagrama momento-curvatura calculado se muestra en la Figura B. 2, donde se observa que el momento de fluencia es $M_y = 267.13$ kNm y el de ruptura es $M_u = 274.33$ kNm. Sus respectivas curvaturas son $\phi_y = 0.0083$ y $\phi_u = 0.034$.

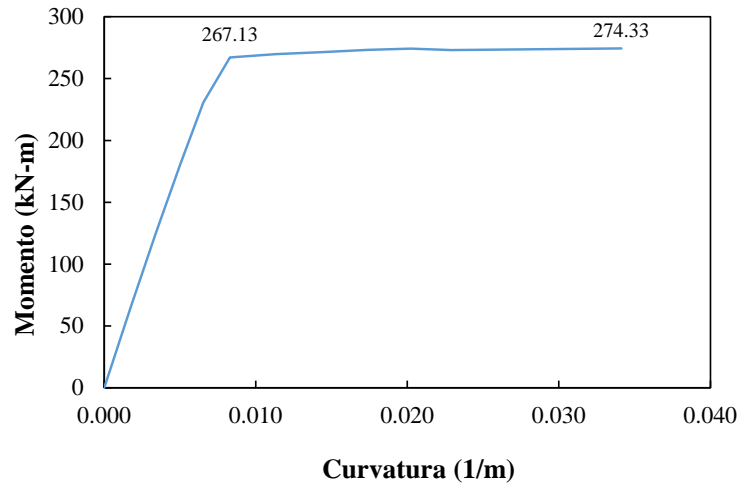


Figura B. 2 Curva momento-curvatura de la sección 20x50 sólo con momento incremental.

La curvatura es a la sección, y la capacidad de giro es a la pieza. Por lo tanto, para determinar el diagrama momento-rotación, basta multiplicar las curvaturas de la sección correspondientes a cada uno de los momentos incrementales por la longitud total de la pieza, que para este ejemplo es 2.5 m (Tenorio 2012). Entonces, el diagrama momento-rotación es como se muestra en la Figura B. 3:

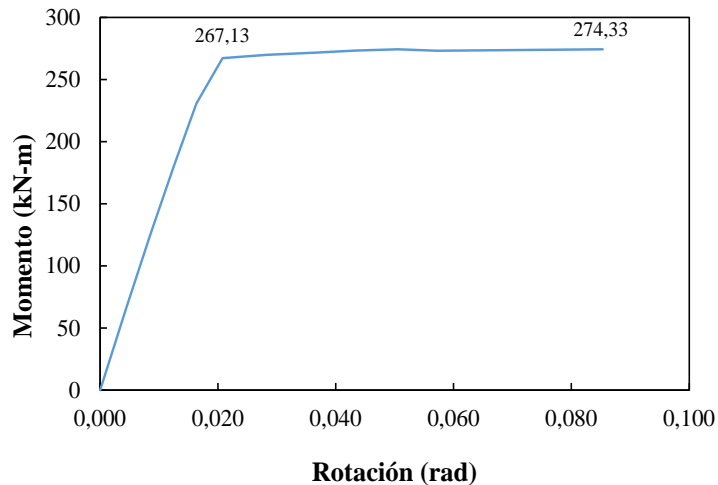


Figura B. 3 Curva momento-rotación de la sección 20x50 sólo con momento incremental.

B.1.2 *Momento incremental en el extremo y carga axial*

La viga en voladizo estudiada en el ejemplo anterior se analiza nuevamente pero en este ejemplo se le aplicó una carga axial constante $N = 100$ kN, y posteriormente se le impone un momento incremental en el extremo libre, como se muestra en la Figura B. 4. La carga axial aplicada modifica el comportamiento constitutivo momento – curvatura, ya que incrementa la capacidad a momento de la pieza, pero reduce su ductilidad, pues esta alcanza su momento de ruptura a una curvatura menor.

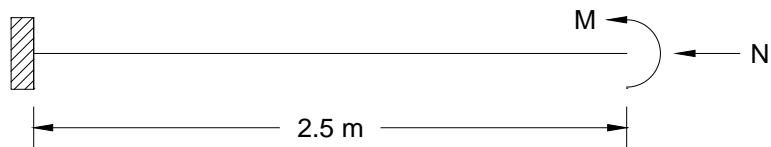


Figura B. 4 Viga en voladizo con momento incremental y carga axial constante en el extremo.

Como se observa en la Figura B. 5, el momento de fluencia es $M_y = 280.03$ kNm, y el de ruptura es $M_u = 282.52$ kNm. Sus respectivas curvaturas son $\phi_y = 0.008$ y $\phi_u = 0.032$.

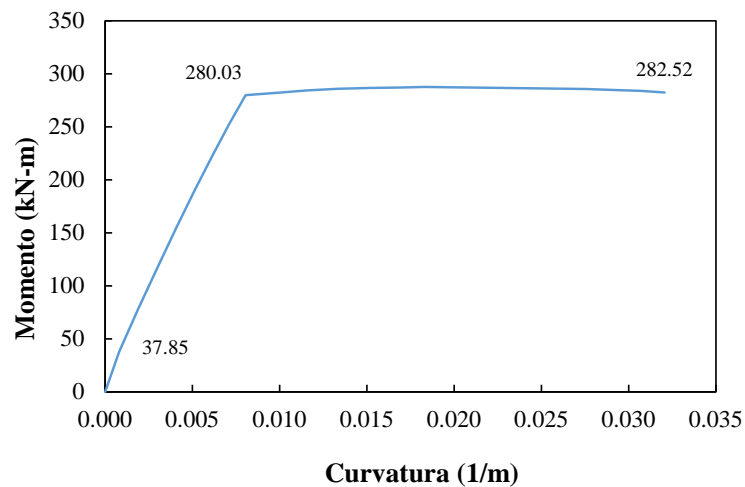


Figura B. 5 Curva momento-curvatura de la sección 20x50 con momento incremental y carga axial.

La comparación de las curvas momento-curvatura y momento - rotación para ambos casos (sin y con carga axial), se muestran respectivamente en las figuras (B.4)y (B.13) donde se observa que la diferencia entre ambos ejemplos se atribuye al efecto de la carga axial.

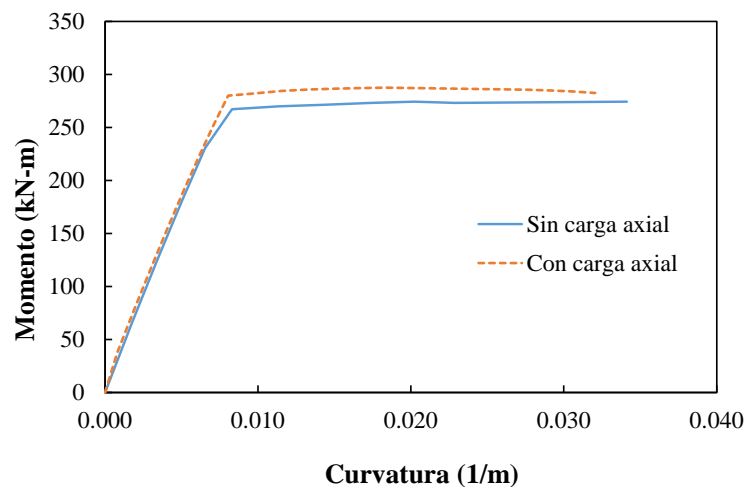


Figura B. 6 Comparación de curvas momento – curvatura con y sin carga axial.

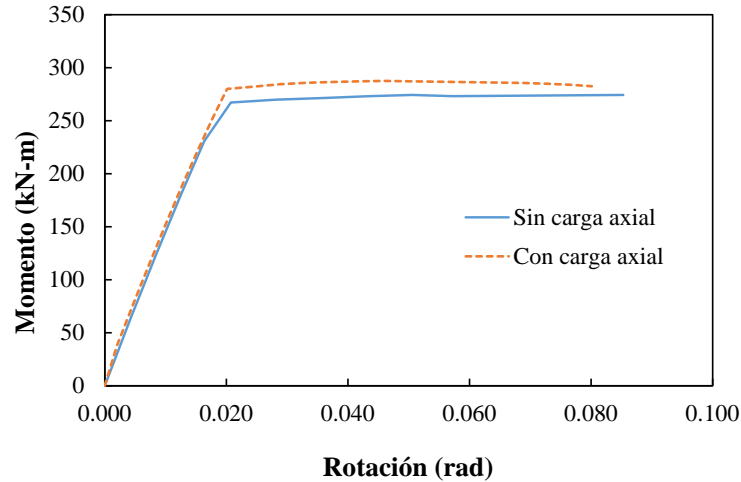


Figura B. 7 Comparación de curvas momento – rotación con y sin carga axial.

B.2 Marcos con discontinuidades

El marco de dos niveles mostrado en la Figura B. 8a, tiene un claro con una longitud de 350 cm y altura de 200 cm en cada nivel. Las secciones transversales y acero de refuerzo de las columnas y vigas se muestran en la Figura B. 8b. Este marco fue modelado por Jukic (2013) utilizando elementos vigas con discontinuidades en la rotación, en el que discretizó las vigas y columnas en elementos de 25 centímetros de longitud. El concreto tiene las propiedades mecánicas siguientes: módulo de Young $E_c = 28.6$ GPa y esfuerzo último a compresión $f'_c = 30$ MPa. El acero tiene como propiedades mecánicas: módulo de Young $E_s = 192.5$ GPa y esfuerzo de fluencia $f_y = 418$ MPa. Ambas secciones transversales, viga y columna, tienen área de acero longitudinal $A_s = 11.36$ cm² en la parte superior e inferior. Con estas propiedades se determinaron las curvas momento–curvatura (Figura B. 9) y momento–rotación (Figura B. 10) de ambos elementos.

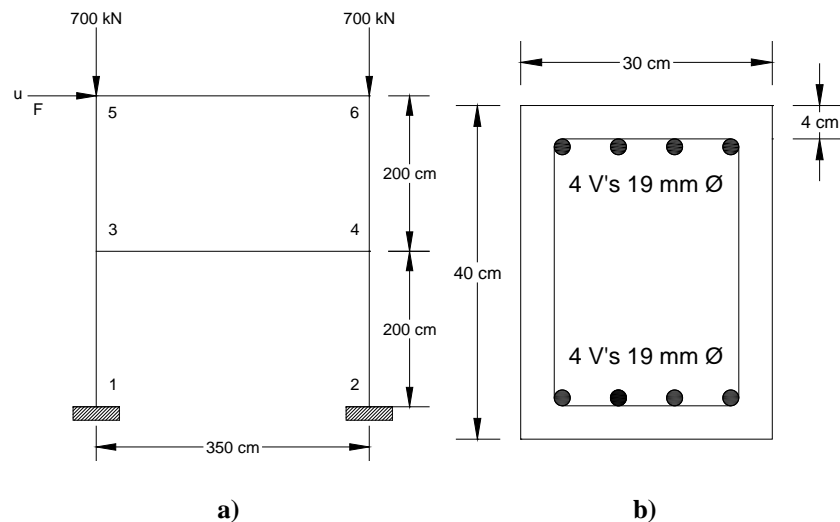


Figura B. 8 a) Marco estructural y b) Sección transversal de vigas y columnas.

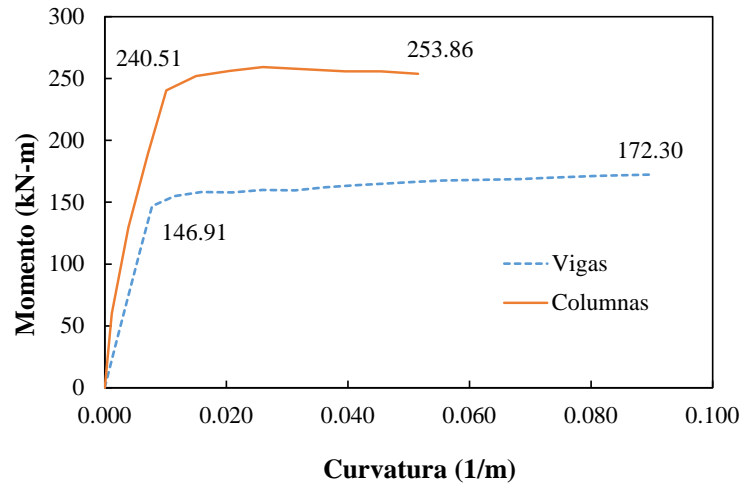


Figura B. 9 Diagrama momento – curvatura de la sección 30 x 40 con y sin carga axial.

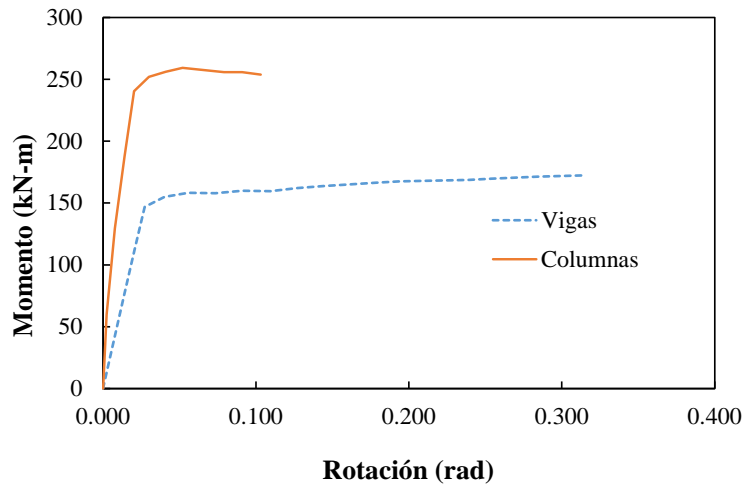


Figura B. 10 Diagrama momento – rotación de la sección 30 x 40 con y sin carga axial.

Nuevamente se observa que en el caso de los elementos que tienen sobre sí una carga axial aplicada (columnas), que para este ejemplo es de $N = 700$ kN, tienen mayor capacidad de resistir momentos flexionantes, pero su ductilidad se reduce, ya que el momento resistente último ocurre a una curvatura menor. Lo anterior tienen su explicación en el hecho de que, al tener una carga axial aplicada, existe una deformación inicial en la pieza, favorable para la parte que está por debajo del eje neutro, y desfavorable para la parte que se encuentra por encima de este, ya que primero debe superarse esa deformación negativa en la parte inferior (sujeta a tensión) permitiéndole así tener mayores deformaciones antes de alcanzar la fluencia (razón por la cual resiste mayores momentos), y en la parte superior (sujeta a compresión) ya existe esa deformación inicial que en este caso es positiva, reduciéndose el umbral de ruptura del concreto, alcanzando antes su deformación unitaria de aplastamiento (razón por la cual tiene menos ductilidad).